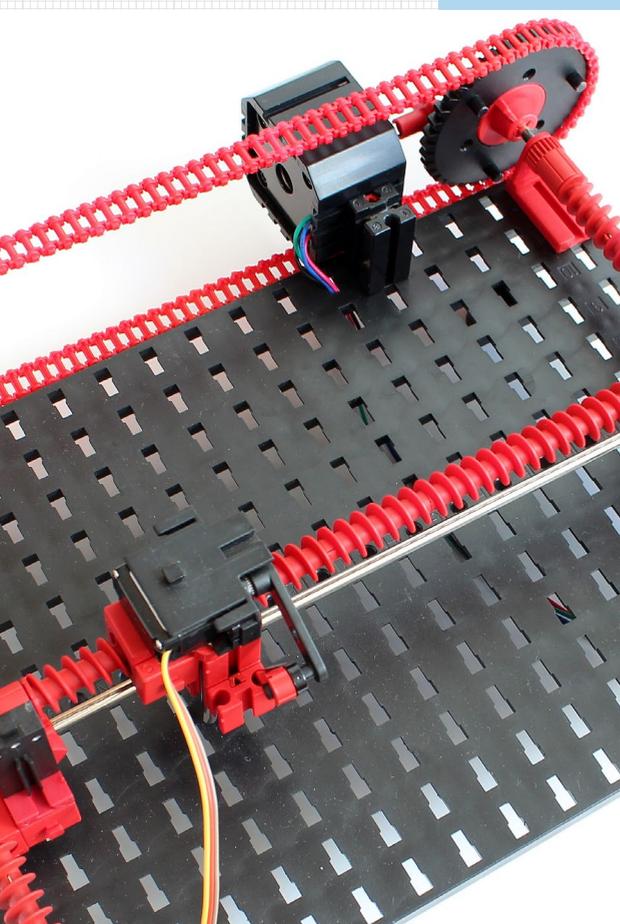


5

Der Plotter

Ist ein Plotter ein Anachronismus? Gelingen doch mit Laserdruckern Ausdrücke, die zumindest für das bloße Auge hochpräzise wirken. Tatsächlich übertreffen Plotter aber auch heute noch moderne Drucker in Präzision und Auflösung. Häufig werden CAD-Zeichnungen daher mit großen Plottern gedruckt. Auch ist die Plattertechnik Grundlage zahlreicher weiterer, ausgesprochen moderner Geräte: So arbeiten Lasercutter mit denselben Algorithmen und Mechanismen, und ein 3D-Drucker macht im Grunde wenig anderes, als – Schicht für Schicht – eine sehr große Anzahl von 2D-Plots nacheinander auszuführen. In diesem Kapitel stellen wir einen sehr schnellen fischertechnik-Plotter mit einer hochpräzisen Arduino-Ansteuerung vor.



5.1 Hintergrund

Ein Plotter ist ein elektronisches Zeichengerät, das – anders als ein Drucker, bei dem die Ausgabe Zeile für Zeile erfolgt – wie beim »Malen nach Zahlen« seine Ausgabe über eine genaue Ansteuerung der darzustellenden Punkte auf der gesamten Ausgabefläche erzeugt. Plotter eignen sich besonders für Darstellungen zusammenhängender Linien (wie Funktionsgraphen oder technische Zeichnungen) und wurden daher auch als »Kurvenschreiber« bezeichnet. Für Texte hingegen sind Laserdrucker das geeignetere Ausgabegerät, denn das Zeichnen von Buchstaben ist zeitaufwendig.

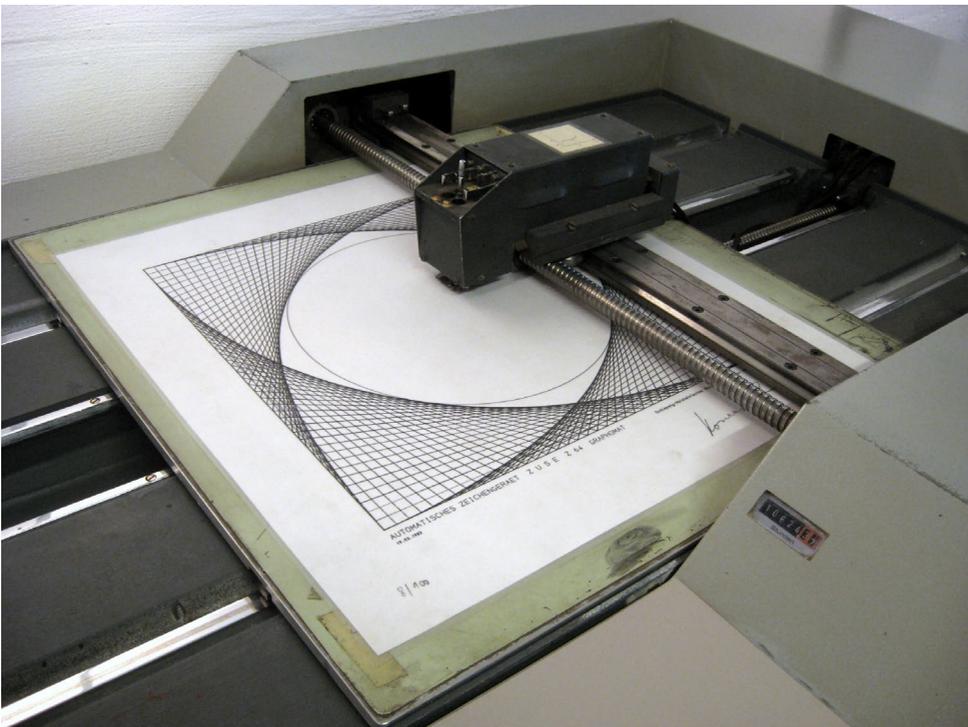


Abb. 5-1 Graphomat Z64 der Zuse AG

Die meisten Plotter sind Flachbettplotter, bei denen das Papier für die Ausgabe flach eingelegt und gegen Verrutschen fixiert wird. Plotter für sehr große Ausgabeformate wie A0 werden oft als Rollenplotter realisiert, bei denen das Papier über eine Rolle gelegt wird und die exakte Positionierung des Stifts durch die horizontale Bewegung des Schreibkopfes und die Drehung dieser Rolle (also den Transport des Papiers) erfolgt.



Plotter haben eine spannende Geschichte: *Konrad Zuse* (1910-1995), der Entwickler des ersten programmierbaren Computers, konstruierte mit seiner 1956 gegründeten Zuse AG auch den weltweit ersten Plotter – den *Graphomat Z64* –, vorgestellt vor fast 60 Jahren auf der Hannovermesse 1961 (Abb. 5–1). Die Zeichengenauigkeit des Geräts lag bei beachtlichen 0,02 mm, die Plot-Geschwindigkeit bei 22,5 mm/sec. Mit einem Gewicht von 1,4 Tonnen und einem Preis von 128.000 DM war das Gerät jedoch eher ungeeignet für das heimische Arbeits- oder Kinderzimmer.

Heute werden Plotter noch immer eingesetzt, wenn es auf eine besonders hohe Präzision der Ausgabe ankommt, wie beispielsweise bei Bauzeichnungen. In jüngster Zeit hat die Plottertechnik zudem mit der Verbreitung von Lasercuttern eine Renaissance erlebt: Das exakte Schneiden von Elementen mithilfe eines hochenergetischen Laserstrahls aus einer Materialplatte ist nichts anderes als der »Plot« einer Zeichnung.

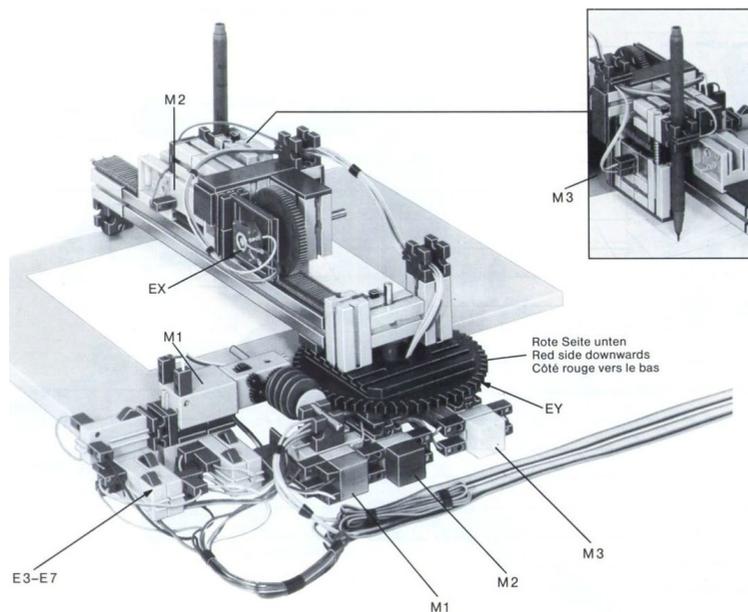


Abb. 5–2 Polarkoordinaten-Plotter aus *fischertechnik Computing* (30554), 1984 [2]

Ein Plotter ist ein geradezu ideales *fischertechnik*-Modell: Mit einer geeigneten Mechanik gelingt eine ziemlich genaue Positionierung des Schreibkopfes, und die Controller-Ansteuerung verwendet einige algorithmisch sehr interessante Lösungen. Kein Wunder also, dass sich Plottermodelle wie ein roter Faden durch die Geschichte von *fischertechnik* ziehen. Ein erster »XY-Schreiber« mit Handsteuerung findet sich schon im Clubheft 4/1977 [1]. Und gleich mit den ers-

ten Computing-Baukästen kamen Plottermodelle auf den Markt. Der legendäre Baukasten fischertechnik Computing aus dem Jahr 1984 (30552) enthielt einen mit Potenziometern gesteuerten Polarkoordinaten-Plotter, der in Basic programmiert wurde (Abb. 5–2) [2].

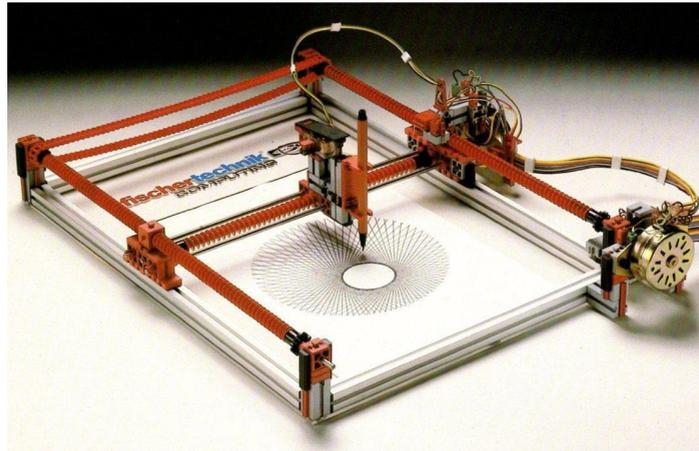


Abb. 5–3 fischertechnik-Baukasten Plotter-Scanner (30571), 1985 [3]

1985 brachte fischertechnik mit dem Baukasten Plotter/Scanner (30571) einen Flachbettplotter mit Schrittmotoren heraus, der ebenfalls in Basic programmiert wurde (Abb. 5–3, [3, 4, 5]) – 24 Jahre nach dem Zuse-Plotter und zu einem 500stel dessen Preises. Es folgten ein Plotter mit einer HP-GL-Steuerung in Basic (in CHIP Special »fischertechnik und Computer«, 1987 [6]) und der Baukasten Profi Computing (30490) mit einem Plotter, der Impulsscheiben zur Stiftabsenkung verwendete, programmiert in Turbo-Pascal und beschrieben im »Experimentierbuch Profi Computing« aus dem Jahr 1991 (36069) [7, 8].

Auch der fischertechnik-Fan-Gemeinde gelangen in den vergangenen Jahren immer wieder beeindruckende Plottermodelle, die Grafiken mit sehr hoher Präzision erzeugen konnten, wie z. B. der hochpräzise Polarkoordinaten-Plotter von David Holtz (Abb. 5–4) [9].

Für unseren Plotter haben wir viele gute Entwurfsideen dieser Plottermodelle aufgegriffen. Dabei haben wir ihn weitestmöglich mit Standardteilen von fischertechnik realisiert und versucht, die Zahl der Bauteile auf ein Minimum zu begrenzen – ohne dadurch die Präzision der Ansteuerung zu verringern.

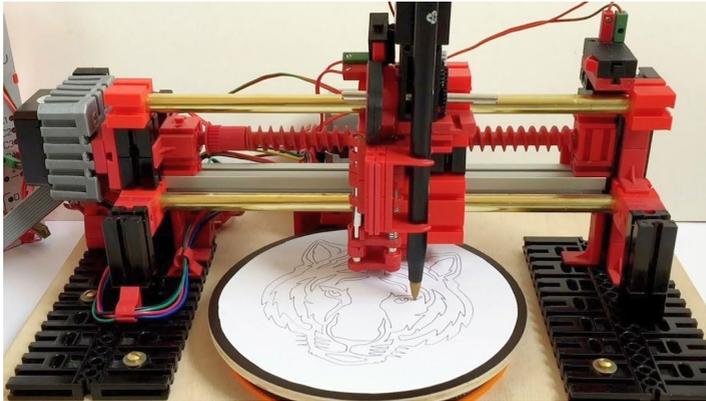


Abb. 5–4 Polarkoordinaten-Plotter von David Holtz (Foto: David Holtz) [9]

Damit der Plotter möglichst leicht nachgebaut werden kann, sollte unsere Konstruktion die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Verwendung von ausschließlich originalen fischertechnik-Bauteilen,
- weitestgehender Verzicht auf Spezialteile, die sich nur in wenigen fischertechnik-Materialsammlungen finden (da deren nachträgliche Beschaffung vor allem bei älteren Bauteilen manchmal nicht einfach ist),
- Verwendung einer möglichst geringen Gesamtzahl an Bauteilen (»minimalistische« Realisierung),
- hohe Steifigkeit des Modells und
- hohe Präzision der Ansteuerung.

Einige dieser Anforderungen lassen sich nicht ohne Einschränkung gleichzeitig erfüllen – so erreicht man ein Maximum an Steifigkeit z. T. nur mit Spezialbauteilen wie Aluminiumprofilen oder einer großen Zahl an Bausteinen. Allerdings gilt auch: Jede zusätzliche Komplexität der Konstruktion erhöht die Anzahl der Stellen, an denen verrutschte Bausteine oder lockere Verbindungen die Genauigkeit des Plotters beeinträchtigen können. Daher ist auch bei der Steifigkeit weniger manchmal mehr. Auch das Gewicht spielt eine Rolle: Je leichter – und damit auch leichtgängiger – die beweglichen Teile sind, desto geringer ist die Beeinträchtigung der Genauigkeit des Antriebs. Daher kann sich eine minimalistische Konstruktion auch positiv auf die Präzision auswirken.

Das in diesem Kapitel vorgestellte Modell versucht einen möglichst guten Kompromiss zwischen den oben genannten Zielsetzungen. Dennoch ist unser Modellvorschlag nicht die einzig mögliche Realisierung – wie immer sind mit

fischertechnik Varianten möglich und werden von uns sogar ausdrücklich empfohlen. Denn viele Eigenschaften wie z. B. die Steifigkeit der Konstruktion lassen sich am besten durch Experimentieren nachvollziehen und womöglich gegenüber der von uns vorgeschlagenen Konstruktionsvariante noch weiter verbessern.

5.2 Mechanische Konstruktion

Ein Plotter besteht im Kern aus zwei Mechanismen: der möglichst genauen Positionierung des Schreibkopfes und der Absenkung bzw. Anhebung des Stifts. Für die mechanische Realisierung der Positionierung des Schreibkopfes, also der Bewegung des Stifts in X- und Y-Richtung, gibt es verschiedene Möglichkeiten, darunter ein Schnur- oder Kettenantrieb, die Verwendung von Zahnstangen bzw. einem Hubgetriebe oder einem Schneckengetriebe. Alle diese Mechanismen erreichen nur eine begrenzte Genauigkeit bei der Positionierung: So verringern Fertigungstoleranzen bei den Bauteilen, eine geringe Steifigkeit, die unter Kräfteinwirkung zu Verformungen führt, sowie das Spiel der Antriebe die Präzision, die sich theoretisch erreichen lässt.

Von den genannten Antriebsvarianten eignen sich besonders die fischertechnik-Schneckengetriebe für eine möglichst genaue Positionierung, da sie eine sehr einfache und in der Summe vergleichsweise spiel- und reibungsarme, zugleich sehr hoch aufgelöste Ansteuerung ermöglichen. Wahrscheinlich kamen sie aus genau diesem Grund auch schon beim fischertechnik-Plotter aus dem Jahr 1985 zum Einsatz (Abb. 5–3) [3]; auch der Zuse-Plotter positionierte den Schreibkopf mit einem Schneckengetriebe (Abb. 5–1).

Mit einigen konstruktiven Kniffen lässt sich das aus Produktionstoleranzen resultierende und damit unvermeidliche Spiel der Bauteile deutlich verringern, sodass wir mit dem Schneckengetriebe eine vergleichsweise präzise mechanische Ansteuerung erhalten. Das ist für unseren Plotter besonders wichtig, da sich auch kleinste Ungenauigkeiten in der Ansteuerung über den gesamten Plot eines Bildes aufsummieren können.

Grundplatte

Als Grundplatte verwenden wir für unseren Plotter wie im 1991er-fischertechnik-Modell [7] die Experimentierplatte 500. Sie ist in vielen Baukästen enthalten und vereinfacht einen stabilen und maßgetreuen Aufbau durch die präzisen Zapfenlöcher, die ein Verrutschen des Aufbaus (wie bei Nuten möglich) verhindern. Zwar ist die Zeichenfläche damit auf etwas weniger als DIN A5 beschränkt; diese Größe ist jedoch ausreichend, um alle wesentlichen Funktionen eines Plotters zu realisieren. Die Größenbeschränkung ergibt sich auch aus einem weiteren



Grund: Da wir für die Positionierung und stabile Führung des Schreibkopfes Metallachsen verwenden, ist die Größe des Plottermodells ohnehin durch deren maximale Länge von 260 mm begrenzt.

Natürlich ist es möglich, auf der Grundlage unseres Modells einen größeren Plotter zu bauen, z. B. auf einer Grundplatte 1000 (wie im Plotter-Baukasten von 1985 [3]). Dazu benötigt man entweder 500 mm lange Metallachsen, die sich zwar nicht im originalen fischertechnik-Sortiment finden, sich aber leicht selbst anfertigen oder auf Maß beschaffen lassen, oder aber eine andere Antriebskonstruktion – und natürlich insgesamt mehr Bauteile. Hier ist viel Spielraum für eigene Modifikationen unseres Plotters.

Schlitten

Wir beginnen die Beschreibung des Plotteraufbaus mit dem mechanisch sensibelsten Teil: den Getrieben für die Positionierung. Hier ist besondere Sorgfalt vonnöten, damit die Genauigkeit der Ansteuerung möglichst wenig durch Spiel oder Reibung beeinträchtigt wird.

Um den Stift (genauer: den Schreibkopf) an jede Position des Zeichenfeldes bewegen zu können, benötigt man einen »Schlitten«, auf dem der Schreibkopf in der Horizontalen (der x-Achse) über die lange Seite der Experimentierplatte geführt wird. Dazu montieren wir ein Schneckengetriebe aus fünf Schneckenteilen (37926) mit zwei klemmbaren Schnecken (37858) und zugehörigen Zangenmuttern (31915) auf einer 260 mm langen Metallachse. Mit dieser Führung können wir den Schreibkopf fast über die gesamte Längsseite eines DIN-A5-Blattes bewegen. Um später das Spiel des Schneckengetriebes zu verringern, drehen wir nicht eine, sondern zwei Schneckenmuttern (37925) auf das Getriebe. Das Schneckengetriebe muss so montiert werden, dass die Achse auf der einen Seite etwa 0,5 cm weit herausragt. Dabei muss darauf geachtet werden, dass sich beide Schneckenmuttern ohne spürbaren Widerstand an den Schnecken entlangdrehen lassen; die Schneckenteile müssen dafür ggf. zum Schluss ein wenig gegeneinander verdreht werden, sodass zwischen ihnen kein Stück der Achse sichtbar bleibt.

Um die Achse möglichst reibungsarm zu lagern, verwenden wir für das kurze herausstehende Achsenstück eine Gelenkwürfel-Klaue (31436) mit eingeschober Lagerhülse (36819). Auf der anderen Seite schieben wir die Achse durch einen BS 15 mit Bohrung (32064), da wir hier später noch den Antrieb ergänzen müssen. Der BS 15 mit Bohrung sollte sich möglichst reibungsfrei um die Achse drehen lassen. Am verbleibenden Ende der Metallstange montieren wir hinter dem BS 15 mit Bohrung ein Z40 so, dass die Nabennutter nach innen und die Zähne des Kronradgetriebes nach außen zeigen (Abb. 5–5).



Abb. 5-5 Konstruktion des Schlittens (x-Achse); darauf wird später der Schreibkopf montiert.

Der Schlitten muss nun senkrecht zur Langseite der Grundplatte (also entlang der y-Achse) über den gesamten Ausgabebereich des Plotters bewegt werden können. Das realisieren wir über zwei weitere identische, an den Schmalseiten der Experimentierplatte zu befestigende Schneckengetriebe aus drei Schnecken teilen und zwei klemmbaren Schnecken auf je einer Metallachse 200. Auch hier lassen wir die Stangen auf einer Seite etwa 0,5 cm herausragen und setzen je zwei Schneckenmuttern auf das Gewinde, die sich ebenfalls ohne merklichen Widerstand drehen lassen sollten (Abb. 5-6).

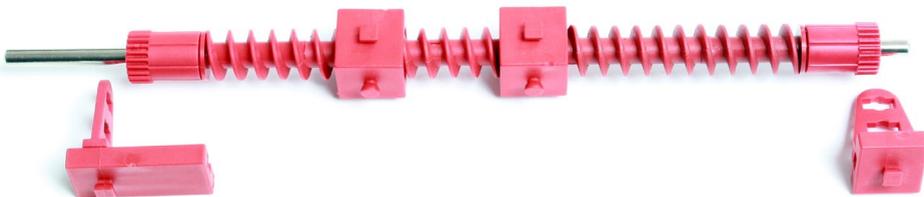


Abb. 5-6 Schneckengetriebe für die Schlittenpositionierung (2x)

Als Lagerung für die beiden Achsen verwenden wir je zwei Kupplungsstücke (38253), die zwar ein wenig Spiel haben, dafür aber praktisch keine Reibung verursachen. Je eines stecken wir auf einen BS 5, das zweite auf einem BS 15 × 30 × 5 mit Nut und Zapfen.

Damit können wir nun die beiden Schneckengetriebe auf der Grundplatte montieren. Die (in Abb. 5-7 hinteren) Kupplungsstücke werden dabei gerade so weit in die Nut der BS 15 × 30 × 5 geschoben, dass sich die Achsen der Schneckengetriebe leicht drehen, ohne zu verrutschen. Auf die herausstehenden Enden der Achsen setzen wir zwei Z40 so, dass die Zähne des Kronradgetriebes nach außen zeigen; darüber erfolgt später der Antrieb. Die beiden Zahnräder werden



wir noch durch eine Kette verbinden, um die Achsen (und damit die Schneckengetriebe) synchron zu drehen (Abb. 5–7).

Schließlich fügen wir noch den Schlitten ein, indem wir die Lager für die Achse des Schneckengetriebes mit je einem BS 7,5 auf der jeweils hinteren Schneckenmutter der beiden seitlichen Schneckengetriebe fixieren. Dabei ist darauf zu achten, dass der BS 7,5 nicht auf einen der runden Zapfen geschoben wird. Dann werden auch hier die Lager so dicht an die Schnecken geschoben, dass die Achse sich leicht dreht, aber kein Spiel zum Verrutschen hat.

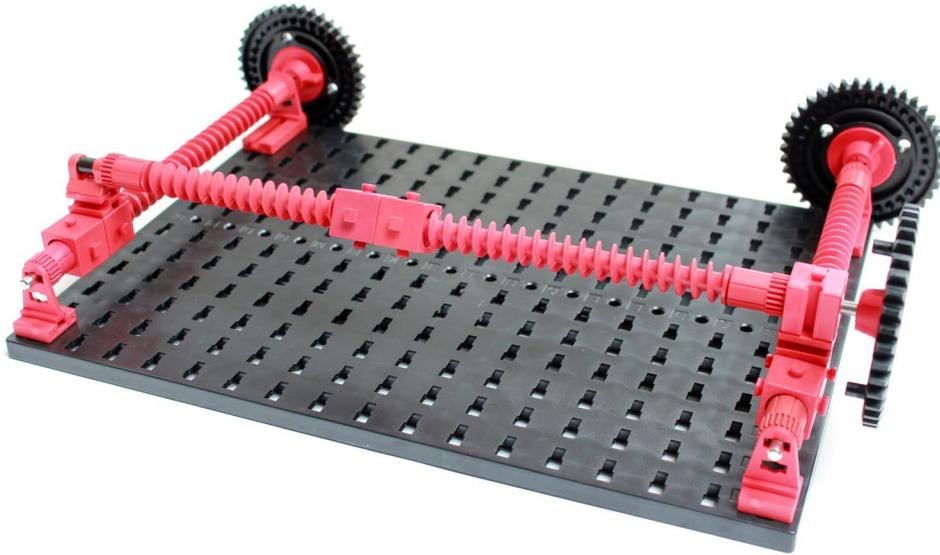


Abb. 5–7 Montage der beiden seitlichen Schneckengetriebe und des Schlittengeriebtes auf der Grundplatte 500

Da wir die seitlichen Schneckengetriebe aus Stabilitätsgründen möglichst dicht über der Grundplatte angebracht haben, ragen die beiden Z40 ein wenig nach unten über die Grundplatte hinaus. Deshalb müssen wir den Plotter im Betrieb entweder auf eine mindestens 0,5 cm hohe Unterlage oder an eine Tischkante stellen. Alternativ können wir unter der Grundplatte vier »Füße« befestigen (siehe weiter unten).

Damit ist die für die Positionierung des Schreibkopfes verantwortliche Mechanik fertig. Allerdings haben die Schneckenmutter auf den Schnecken ein wenig Spiel – sie lassen sich teilweise um mehr als einen Millimeter auf der unbewegten Spindel verschieben. Dieses Spiel lässt sich durch die Verbindung mit einer zweiten, »benachbarten« Schneckenmutter beseitigen [10, 11]. Dazu werden die beiden Schneckenmutter durch Drehen auf der Spindel jeweils mög-

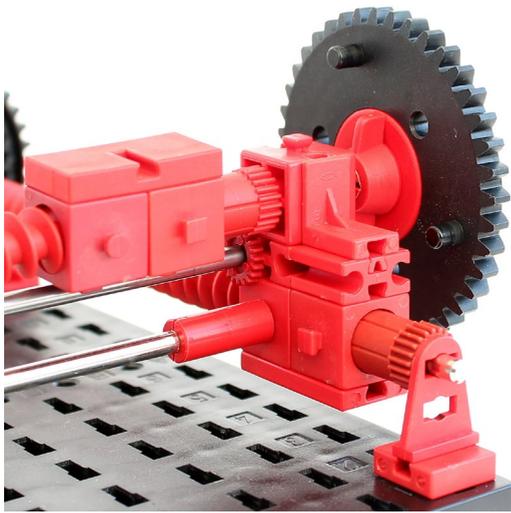


Abb. 5–8 Stabilisierung der Lagerung der Schlittenachse

lichst dicht nebeneinander gebracht, ohne das Schneckengetriebe zu verklemmen. Ist der Abstand zu groß, kann man das meist durch Drehen oder Tauschen der Schneckenmutter korrigieren. Die beiden jeweils benachbarten Schneckenmutter der seitlichen Schneckengetriebe verbinden wir auf der Unterseite durch jeweils eine Bauplatte $15 \times 30 \times 3,75$ mit Nut (32330); die Schneckenmutter des Schlittens verbinden wir auf der Oberseite durch einen Baustein $15 \times 30 \times 5$ mit drei Nuten (38428), sodass die Öffnung der oberen Nut nach »vorne« zeigt (siehe Abb. 5–8).

Damit verkürzen wir zwar die Hubstrecke der Spindeln und verkleinern so die mit dem Schreibkopf erreichbare Zeichen-

fläche, aber wir verhindern, dass z. B. bei einem Richtungswechsel Drehimpulse vom Spiel der Spindel »verschluckt« werden oder Verzerrungen durch ein Kippen des Schreibkopfes entstehen.

Die (in Abb. 5–7 rechte) Lagerung der Schlittenachse in einem BS 15 mit Bohrung müssen wir zusätzlich stabilisieren, da hier später noch der Antriebsmotor ergänzt wird. Dazu benötigen wir drei weitere Bauteile: einen BS 7,5, einen Federnocken und einen Winkelstein $10 \times 15 \times 15$ (38423). Den BS 7,5 schieben wir auf die vordere Schneckenmutter, den Winkelstein mit dem Zapfen von oben in den BS 15 mit Bohrung und den Federnocken von vorne in die Nuten von BS 7,5 und Winkelstein (Abb. 5–8).

Um den Schreibkopf später stabil auf dem Schlitten zu führen, ergänzen wir den Schlitten um zwei weitere Metallachsen:

- Eine Achse 260 wird in die seitliche Nut der BS 7,5 eingeschoben, die die Lager der Schlittenachse führen, und mit zwei Riegelscheiben (36334) gegen Verrutschen gesichert.
- Eine Achse 200 verlängern wir mit zwei roten Klemmkupplungen (31024) und stecken sie auf die beiden nach innen zeigenden runden Zapfen der Schneckenmutter, auf denen wir die Lager des Schlittens befestigt haben (siehe Abb. 5–6).



Auf ähnliche Weise wurde der Schlitten im 1985er-fischertechnik-Plotter mit zwei Führungsstangen neben der Achse des Schneckengetriebes stabilisiert (Abb. 5–3) [3].

Schreibkopf

Eine besondere Herausforderung stellt die Konstruktion des Schreibkopfes dar. Denn der Stift muss so stabil auf dem Schlitten sitzen, dass er beim Zeichnen kein Spiel hat, die Halterung sich also während des Zeichnens, z.B. bei einem Richtungswechsel, nicht verzieht. Zugleich muss er beweglich montiert sein, damit er sehr schnell auf dem Blatt abgesetzt und wieder angehoben werden kann. Dazu stabilisieren wir zunächst den auf der Spindel montierten Teil des Schreibkopfes, indem wir auf die beiden zur Schlittenachse parallelen Metallachsen einen BS 7,5 (mit der seitlichen Nut) und einen BS 15 mit Bohrung stecken und miteinander verbinden. Den BS 7,5 schieben wir auf den unteren (runden) Zapfen der (in Abb. 5–9 rechten) Schneckenmutter des Schlittens auf. Den beweglichen Teil des Schreibkopfes, an dem wir später den Stift befestigen, führen wir mit zwei Metallachsen 50 mm, die wir durch die seitlichen Nuten zweier BS 7,5 stecken und mit zwei Klemmbuchsen 5 (37679) gegen Verrutschen sichern. Den einen BS 7,5 schieben wir auf den vorderen (Achtung: nicht runden, sondern eckigen!) Zapfen der (in Abb. 5–9 rechten) Schneckenmutter, der andere BS 7,5 bleibt lose und wird die Stifthalterung aufnehmen.

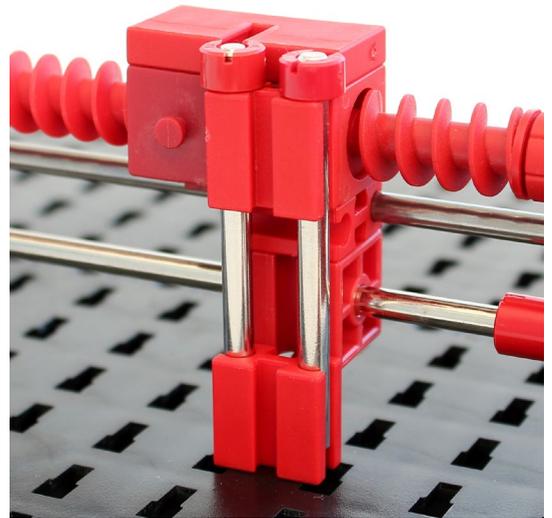


Abb. 5–9 Konstruktion des Schreibkopfes

Für den Mechanismus zum Heben und Senken des Stifts gibt es grundsätzlich drei verschiedene Möglichkeiten, die sich mit fischertechnik realisieren lassen:

- Magnetismus (Elektromagnet), verwendet im fischertechnik-Polarkoordinaten-Plotter und im Plotter/Scanner aus den Jahren 1984/1985 [2, 3]
- Luftdruck (Pneumatik-Kolben)
- Motor (mit Hubtriebe, Schnecke oder Exzenter/Schaltscheibe) [11]

Besonders schnell schalten der Elektromagnet und ein Pneumatik-Kolben. Die fischertechnik-Elektromagnete, die auch in den ursprünglichen Plottermodellen von 1984 und 1985 (siehe Abb. 5–2, 5–3) verwendet wurden, sind jedoch nur

über eine sehr kleine Distanz (1-2mm) stark genug und bewältigen daher nur eine geringe Hubstrecke. Ein Pneumatik-Kolben hat zwar sehr viel mehr Kraft, dafür vergrößert er den Schreibkopf erheblich, und wir müssen zusätzlich einen Kompressor für die Druckluftzufuhr vorsehen und ansteuern.

Es bleiben die mit einem Motor angetriebenen Mechanismen. Ein Mini- oder XS-Motor mit Hubgetriebe oder Schnecke funktioniert, ist aber sehr langsam – und damit für einen Plotter weniger geeignet. Anders als die beiden anderen Mechanismen kommen Hubgetriebe und Schnecke ohne Rückstellfeder aus, benötigen dafür aber einen Endlagentaster zur Feststellung des Stiftstatus (oben/unten), der einen zusätzlichen Eingang an unserem Arduino belegt. Die Abb. 5–10 zeigt eine solche Konstruktion mit einem XS-Motor, einer Rastachse mit Schnecke und passender Schneckenmutter (35977, 35973).

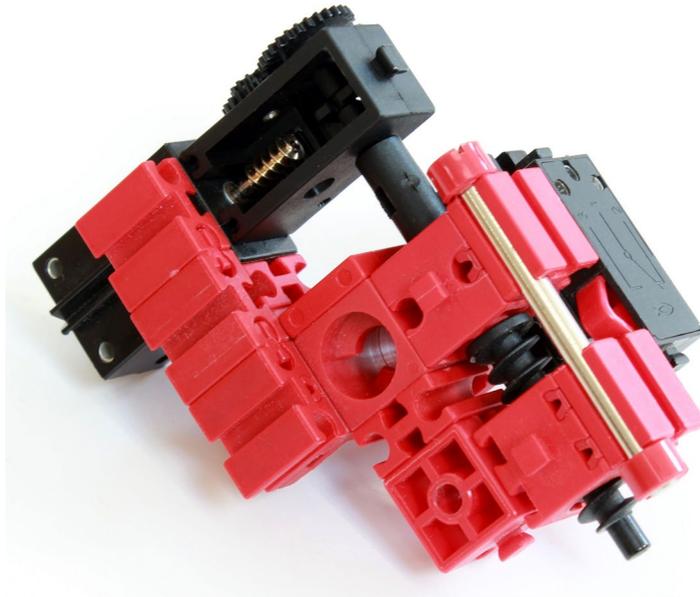


Abb. 5–10 Stiftabsenkung mit XS-Motor und Schnecke sowie Endlagentaster

Schneller und stabiler gegen ein Verrutschen der Bauteile ist ein Motor mit Exzenter, der den Stift auf das Papier drückt. Diese Lösung benötigt eine Rückstellfeder und einen Taster, der vom Exzenter betätigt wird, um den Stiftstatus festzustellen. Als Exzenter eignen sich die Schaltscheiben (37727) (Abb. 5–11) [11].

Die Grundidee für diese Konstruktion findet sich schon im fischertechnik-Plotter von 1991 [7]. Dabei drücken die Schaltscheiben den Stift aufs Papier und eine Rückstellfeder hebt ihn ab, sobald jene ihn freigeben. Ein zugleich von den



Schaltscheiben betätigter Minitaster (37783) dient als Positionsindikator: Ist er gedrückt, ist der Stift unten. Angetrieben werden die Schaltscheiben von einem Minimotor (37488) mit U-Getriebe (31078). Zwar schaltet ein Achsgetriebe etwa um den Faktor 4,6 schneller, allerdings kann es dabei – abhängig von der Stärke der Rückstellfeder – mit der Motorkraft eng werden und die Schaltscheibe bleibt hängen. Mit einem XS-Motor ließe sich der gesamte Schreibkopf noch kompakter konstruieren, aber dann reicht das Drehmoment nicht, um den Stift gegen die Federspannung herunterzudrücken.

Als Rückstellfeder kann man eine kurze Kugelschreiberfeder verwenden, die fischertechnik-Druckfedern 15×5 sind dafür zu lang. Eingesetzt auf der Metallstange sorgt die Feder für ein kraftvolles (und damit schnelles) Anheben des Plotterstifts.

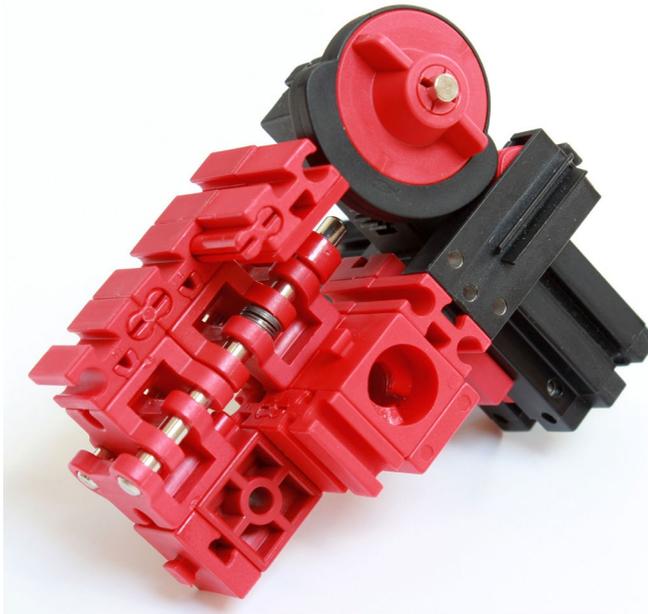


Abb. 5–11 Stiftabsenkung mit Minimotor, Schaltscheiben und Rückstellfeder [11]

Wesentlich schneller und zugleich schlanker (und eleganter) gelingt die Stiftabsenkung unter Verwendung des fischertechnik-Servomotors (132292). Wir können ihn über den Arduino sehr genau positionieren, und seine Reaktionszeiten sind ebenso kurz wie die eines Pneumatik-Kolbens; auch benötigen wir keinen automatischen Rückstellmechanismus. Mit dem TXT Controller funktioniert diese Lösung leider nicht, da er keine Servomotoren ansteuern kann – hier sind wir mit dem Arduino klar im Vorteil.

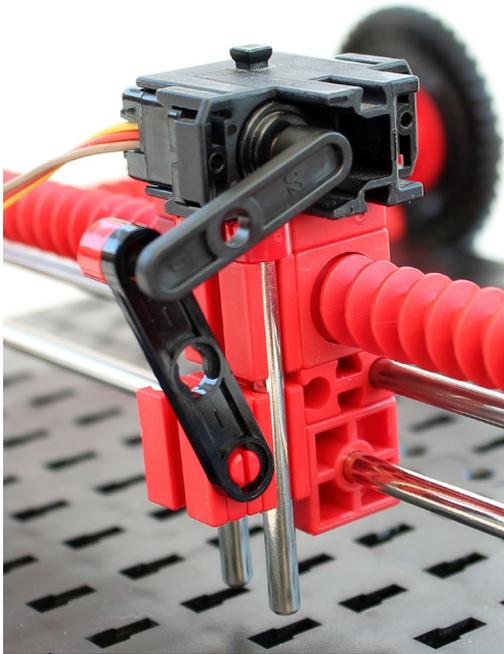


Abb. 5–12 Stiftabsenkung mit Servomotor

Zum Anbau des Servos an den Schreibkopf schieben wir einen Zapfen des Micro-Servo-Adapters (132290) in die obere Nut des Bausteins $15 \times 30 \times 5$ (siehe Abb. 5–9), sodass der Servo seitlich auf dem Schreibkopf zu liegen kommt (Abb. 5–12). Dazu müssen wir die (von vorne betrachtet) linke der beiden Metallachsen 50 kurz entfernen und anschließend die Klemmbuchse wieder aufsetzen. Auf den Hebelarm des Micro-Servohebels LR25 (132004) schieben wir eine Strebe 30, die auf der anderen Seite mit einem Strebenadapter (31848) verbunden wird. Der wiederum wird möglichst fest in die seitliche Nut eines via Federnocken auf dem unteren BS 7,5 befestigten zweiten BS 7,5 eingeschoben. Zuletzt wird der Servohebel auf das Zahnrad der Servoachse gesteckt. Zwischen die Strebe 30 und den Servohebel können wir einen Abstandsring (31597) oder einen Klemmring 0,5 schieben – für die Funktion ist er allerdings nicht erforderlich.

– für die Funktion ist er allerdings nicht erforderlich.

Mit kleinen Servobewegungen können wir nun den unteren, mit dem Hebelarm verbundenen BS 7,5 leicht anheben und absenken. Da der Stift in geringem Abstand über das Blatt »schweben« darf, genügen schon $10\text{--}15^\circ$, um den Stift deutlich vom Blatt abzuheben – entsprechend schnell wirkt der Mechanismus.

Alle drei vorgestellten Mechanismen zur Stiftabsenkung führen jeweils einen BS 7,5 an einer durch die seitliche Nut gesteckten Metallstange auf und ab (Abb. 5–9). Auf diesem BS 7,5 wird nun die Stifthalterung montiert. Welche Bausteine man als Stifthalterung verwendet, hängt in erster Linie von dem gewählten Stift – genauer: von dessen Schaftdurchmesser – ab. Originale Plotterstifte verwenden Tusche und haben eine Strichstärke von 0,2 bis 0,7 mm – und einen beachtlichen Preis, den man vielleicht lieber in einen fischertechnik-Kasten investiert. Daher lohnt ein Blick auf mögliche Alternativen.

In das in mehreren fischertechnik-Plottermodellen eingesetzte Seilwindengestell 30 (35069) passt z. B. ein ganz klassischer Bleistift. Die »Spangen« der Halterung haben einen Durchmesser von etwa 7 mm, können aber auch etwas dickere Stifte aufnehmen. Der von uns verwendete 15 mm längere »größere Bruder« (31997) hat denselben Spangendurchmesser, reduziert jedoch das Spiel des Stifts und hat



eine deutlich größere Materialstärke, wodurch Verwindungen der Halterung praktisch ausgeschlossen sind. Bleistifte sind die günstigste Stiftvariante, allerdings nutzen sich die Minen schnell ab; bei einem längeren Plot verbreitert sich daher nach und nach die Strichstärke, bis der gesenkte Stift irgendwann kaum noch das Blatt berührt.



Abb. 5-13 Bleistifte mit Seilwindengestellen als Stifthalterungen

Ballpen-Minen (Strichstärke 0,7 mm) haben diesen Nachteil nicht und der Schaft passt mit 7 mm ebenfalls ins Seilwindengestell. Für einen festen Sitz müssen sie jedoch mit etwas Textilklebeband umwickelt werden. Allerdings können Ballpen-Minen Farbkleise erzeugen, wenn sie warm werden und länger an einem Punkt gehalten oder sehr langsam geführt werden.

Ein Rollenlager (37636) erlaubt das Einklemmen von Stiften verschiedener Durchmesser (ca. 3 und 8 mm) mittels Rastachsen 20 (31690) oder eines Verbindungsstücks 15 (31060). Damit können beispielsweise Fineliner (Strichstärke 0,4 mm) befestigt werden (Abb. 5-14). Diese Befestigungsmethode findet sich schon im Polarkoordinaten-Plotter von 1984 (Abb. 5-2). Ähnlich können in einem Rollenbock (32085) sehr dünne Stifte mit einem Durchmesser von ca. 2,5 mm eingeklemmt werden.



Abb. 5–14 Rollenlager als Halterung für Fineliner

Die besten Plot-Ergebnisse haben wir mit Großraum-Kugelschreiberminen erzielt. Sie lassen sich mit Klemmhülsen (35980) montieren; einen festen Sitz erreicht man auch hier, indem man den dünneren vorderen Abschnitt der Mine mit etwas Textilklebeband umwickelt. Schiebt man sie in einen senkrecht stehenden BS 7,5, wird daraus ein sehr stabiler Schreibkopf (Abb. 5–15).



Abb. 5–15 Großraum-Kugelschreibermine in Klemmhülsen

Konstruktionshinweise

Beim Aufbau des Plotters muss sehr exakt gearbeitet werden, denn selbst kleinste Ungenauigkeiten können eine fehlerhafte Ansteuerung verursachen. Vor allem die Führungen auf den Stangen, sowohl beim Schreibkopf als auch beim Schlitten, sollten möglichst leichtgängig sein; sie dürfen weder bremsen noch verkannten. Bei allen Bausteinen sollten die Zapfen fest in den Nuten sitzen. Bei lockeren Verbindungen sollte man lieber die Bauteile gegen andere, fester sitzende austauschen, damit sich der Plotter im Betrieb nicht verzieht.



Vor größeren Plots sollte zudem der gute »Sitz« des Schlittens auf den Schnecken noch einmal überprüft werden, denn jedes Spiel der Schneckenmutter kann sich leicht zu deutlich sichtbaren Fehlern im Plot-Ergebnis aufsummieren. Zwischen den Schneckenelementen dürfen auch keine Fugen bestehen, in denen die Schneckenmutter hängen bleiben oder verkanten können.

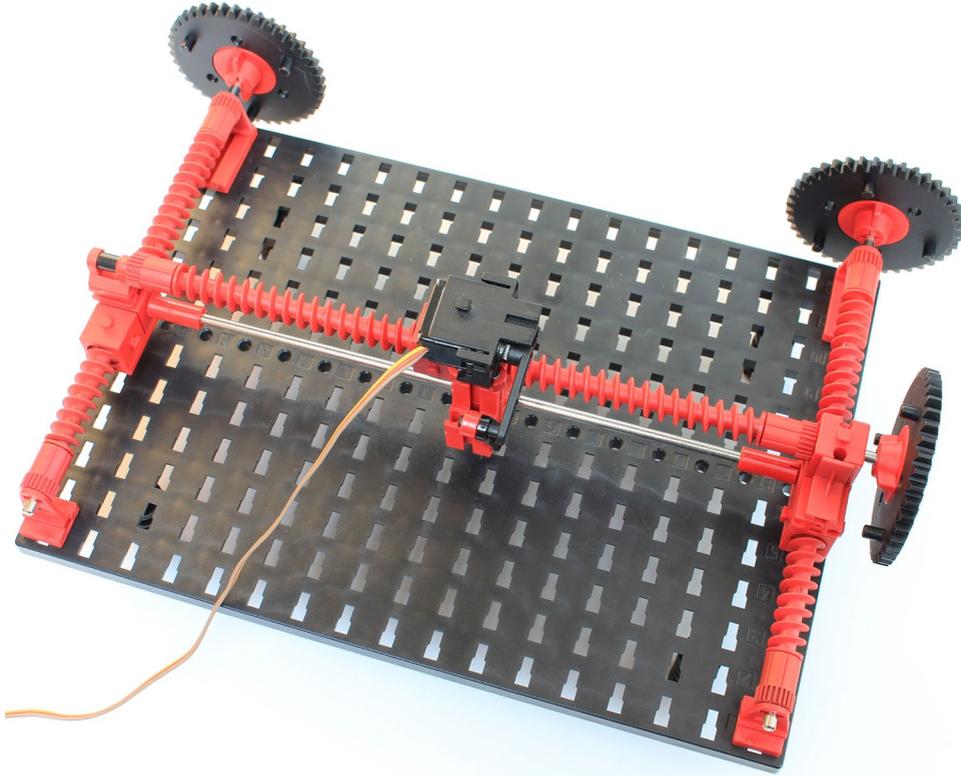


Abb. 5-16 Gesamtansicht des Plottermodells (noch ohne Antrieb)

Damit die nach unten über die Grundplatte hinausragenden Z40 nicht aufsetzen, können wir dem Plotter vier Füße spendieren. Dafür eignen sich Metallachsen 30 (31034) mit aufgesetztem schwarzen Rad 23 (36574) oder die schwarzen Kunststoff-Federn 26 (31760) (Abb. 5-17). Sie lassen sich von unten in dafür vorgesehene Löcher der Grundplatte stecken.

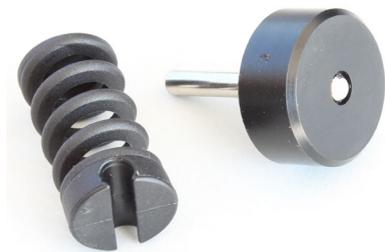


Abb. 5-17 Kunststoff-Federn oder Metallachsen 30 mit Rad 23 als Plotterfüße

5.3 Antrieb

Für den Antrieb benötigen wir Motoren, mit denen wir eine präzise Positionierung des Schreibkopfes vornehmen können. Das gelingt nur, wenn wir die Motorumdrehung in möglichst feiner Auflösung steuern können und die Motoren exakt am gewünschten Punkt stoppen. Zwar lässt sich die Auflösung der Steuerung durch eine entsprechende Untersetzung des Antriebs vergrößern, allerdings verliert man mit jedem Übersetzungsschritt an Präzision, da jedes Getriebe über ein gewisses Spiel verfügt, durch das die Genauigkeit der Ansteuerung beeinträchtigt wird. Und natürlich verlängert sich die Dauer des Plottens entsprechend. Idealerweise verwenden wir also einen Motor, mit dem wir direkt oder über maximal eine Untersetzung die Schneckengetriebe für die Positionierung von Schlitten und Schreibkopf antreiben und dessen Achsenposition wir in möglichst feiner Auflösung bestimmen können.

Nach einigen Experimenten haben wir uns gegen die Verwendung der fischertechnik-Encodermotoren entschieden, denn bei der Ansteuerung kann es vor allem bei sehr kurzen Bewegungen von wenigen Schritten (die bei einem Plotter sehr häufig sind) zum »Überschwingen« kommen, d.h., der Motor dreht – selbst bei einer geringen Motorgeschwindigkeit – gelegentlich über die gewünschte Zahl an Encoderschritten hinaus, bevor er tatsächlich hält. Die sich dadurch aufaddierenden Fehler verfälschen das Plot-Ergebnis erheblich, sofern man nicht die Auflösung der zu plottenden Grafik und damit natürlich auch die Genauigkeit des Resultats verringert. Das passiert auch bei einer Ansteuerung durch den TX/TXT Controller, allerdings sorgt hier der Controller für ein frühzeitiges »Abbremsen« des Motors, sodass die Auswirkungen nicht ganz so stark sind; auch lässt sich das Überschwingen durch eine Verringerung der Motorgeschwindigkeit reduzieren [12]. Der Preis einer geringeren Motorgeschwindigkeit ist jedoch eine lange Laufzeit des Ausgabeprogramms.

Stattdessen setzen wir in unserem Plottermodell zwei bipolare NEMA-14-Schrittmotoren (10V, 0,5A je Strang, 200 Schritte/Umdrehung) für die Ansteuerung der x- und der y-Achse ein, mit denen wir den Schreibkopf ganz exakt positionieren können. Schrittmotoren verwenden keine Sensoren zur Positionsbestimmung (wie Encoder, Drehgeber o. Ä.) und sind daher deutlich präziser in der Ansteuerung. Ein Überschwingen kann bei ihnen nur auftreten, wenn die angetriebene Masse ein (externes) Lastmoment erzeugt, das das Haltemoment des Motors übersteigt. Motoren des amerikanischen NEMA-14-Standards (*National Electrical Manufacturers Association*) haben ein definiertes Haltemoment von 0,3 Nm – für unsere Zwecke ist das bei Weitem ausreichend. Im fischertechnik-Baukasten des 3D-Druckers (160842) sind ebenfalls NEMA-14-Schrittmotoren



enthalten, allerdings dürfte sich der nur in wenigen fischertechnik-Sammlungen finden. Inzwischen können die Motoren auch als Einzelteil erworben werden. Sie sollten gleich zusammen mit den Schrittmotorhaltern des 3D-Druckers (160528) beschafft werden, da wir sie mit diesen stabil in einem fischertechnik-Modell verbauen können. Geeignete NEMA-14-Schrittmotoren gibt es jedoch auch im Elektronik-Fachhandel; auf der Webseite zum Buch finden sich entsprechende Bezugsquellen.

Unsere NEMA-14-Schrittmotoren haben einen weiteren wichtigen Vorteil gegenüber den fischertechnik-Encodermotoren: Sie haben eine Auflösung von 200 Schritten je Achsumdrehung; das entspricht $1,8^\circ$ pro Schritt. Das ist mehr als das Doppelte der Auflösung der fischertechnik-Encodermotoren der ersten Generation (75 Schritte je Achsumdrehung oder $4,8^\circ$) und mehr als das Dreifache der Encodermotoren der zweiten, aktuellen Generation ($63 \frac{1}{3}$ Schritte oder etwa $5,68^\circ$).

Auf die einseitig abgeflachte 4mm-Achse der NEMA-14-Motoren lassen sich mit ein wenig Kraft die roten Z10 der Power-Motoren (159577) aufstecken, die auch als Antriebsritzel für die Schrittmotoren des 3D-Druckers verwendet werden. Die Motoren montieren wir so, dass sie die Z40 der Schlitten- und Schreibkopfachsen über die 32 Zähne des Kronrads antreiben.

Für die beiden seitlichen Schneckengetriebe benötigen wir zur Montage des Schrittmotors lediglich einen BS 30 mit einem Federnocken, dessen Zapfen wir seitlich in eine Nut des Schrittmotorhalters einschieben. Der BS 30 wird so auf die Grundpatte gesteckt, dass das Antriebsritzel in das Kronradgetriebe eines der beiden Z40 eingreift (Abb. 5–18).

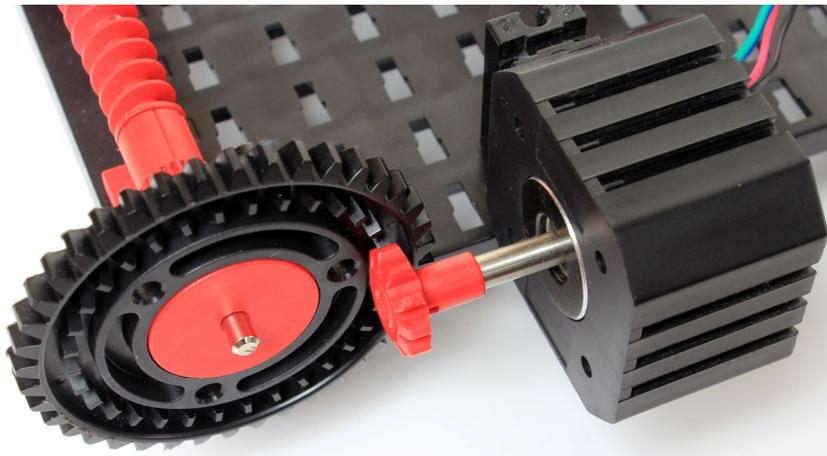


Abb. 5–18 NEMA-14-Schrittmotor mit Ritzel Z10 und Kronrad (Schlittenantrieb)

Nun verbinden wir noch die beiden Z40 mit einer Kette. Diese sollte leicht, aber nicht zu stark gespannt sein: Die beiden Schneckengetriebe müssen sich durch manuelles Ziehen an der Kette weiter leicht drehen lassen. Auf diese Weise kann man das Kettenspiel fast vollständig ausgleichen. Zur Präzision tragen auch die beiden Z40 bei: Im 1985er-Plotter verband fischertechnik zwei Z10er über eine (zudem leicht durchhängende) Kette – das Kettenspiel wirkte sich dort (Abb. 5–3) viermal so stark auf die Schneckengetriebe aus wie in unserem Modell und dürfte bei Richtungswechseln erkennbare Verzerrungen verursacht haben.

Entsprechend verfahren wir beim Schlittenantrieb. Dazu setzen wir auf der rechten Seite des Schlittens einen BS 30 mit je einem BS 5 an jedem Ende auf den roten BS 15 mit Bohrung. Oben ergänzen wir einen BS 7,5, den wir mit einer seitlichen Nut auf den BS 5 stecken. In die mittlere Nut schieben wir einen Federnocken und befestigen den Schrittmotorhalter an dessen Zapfen (Abb. 5–19).



Abb. 5–19 Schrittmotor NEMA-14 mit Ritzel Z10 und Kronrad (Schreibkopfantrieb)

Durch die Untersetzung über das Kronrad des Z40 (32:10) erhöhen wir die Auflösung der beiden Schneckengetriebe um den Faktor 3,2 auf 640 Schritte je (Motor-)Achsumdrehung, also $0,5625^\circ$ je Motorschritt. Da die fischertechnik-Schneckengetriebe bei jeder Achsumdrehung eine aufsitzende Schneckenmutter um genau 1 cm weiterbewegen, erreicht diese Ansteuerung eine Genauigkeit von $0,015625$ mm. Durch die Ansteuerung der Schrittmotoren im Double-Modus verdoppeln wir die Auflösung sogar auf $0,0075$ mm (7,5 Mikrometer). Damit ist unser Plotter – zumindest theoretisch – deutlich präziser als die Standard-



auflösung von HP-Plottern mit $1/1.016'' = 0,025\text{ mm}$ und übertrifft auch die Auflösung von Zuses Graphomat Z64. In der Praxis erreichen wir diese Genauigkeit allerdings bei Weitem nicht, und zwar aufgrund des Spiels von Schneckengetriebe und Stiftbefestigung und natürlich wegen der Dicke der Schreibmine.

Schließlich müssen wir noch zwei Endlagentaster vorsehen, an denen das Erreichen des »Nullpunkts« (untere linke Ecke) erkannt werden kann (Abb. 5–20, 5–21). Das ist mechanisch nicht sehr präzise (die Taster werden nicht immer an exakt der gleichen Stelle aktiviert), aber an dieser Stelle benötigen wir auch keine hohe Genauigkeit: Der Schreibkopf wird bei der Initialisierung an einen Startpunkt bewegt und dieser Punkt wird als Punkt (0, 0) festgelegt.

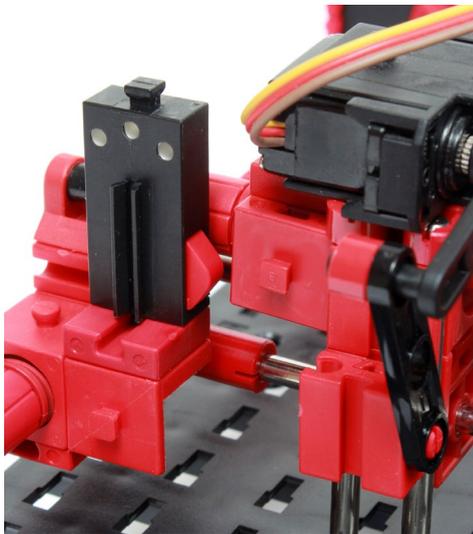


Abb. 5–20 Endlagentaster Schreibkopf

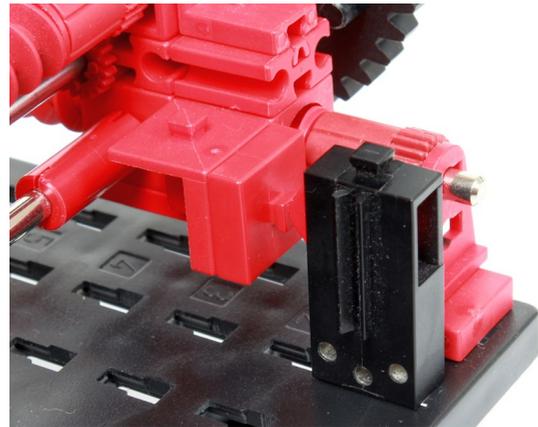


Abb. 5–21 Endlagentaster Schlittenantrieb

Damit ist unser Plotter (Abb. 5–22) mechanisch betriebsbereit. Als Hilfestellung für den Nachbau finden sich auf der Webseite zum Buch eine mit dem Programm »fischertechnik Designer« erstellte Konstruktionsdatei, unterteilt in mehrere Bauphasen, sowie eine Bauteilliste. Was nun noch fehlt, sind der Anschluss aller Sensoren (Taster), Aktoren (Servo- und Schrittmotoren) und eines Speichermediums an den Arduino sowie ein Sketch zum Einlesen einer Vektorgrafik-Datei und zur Ansteuerung des Plotters.

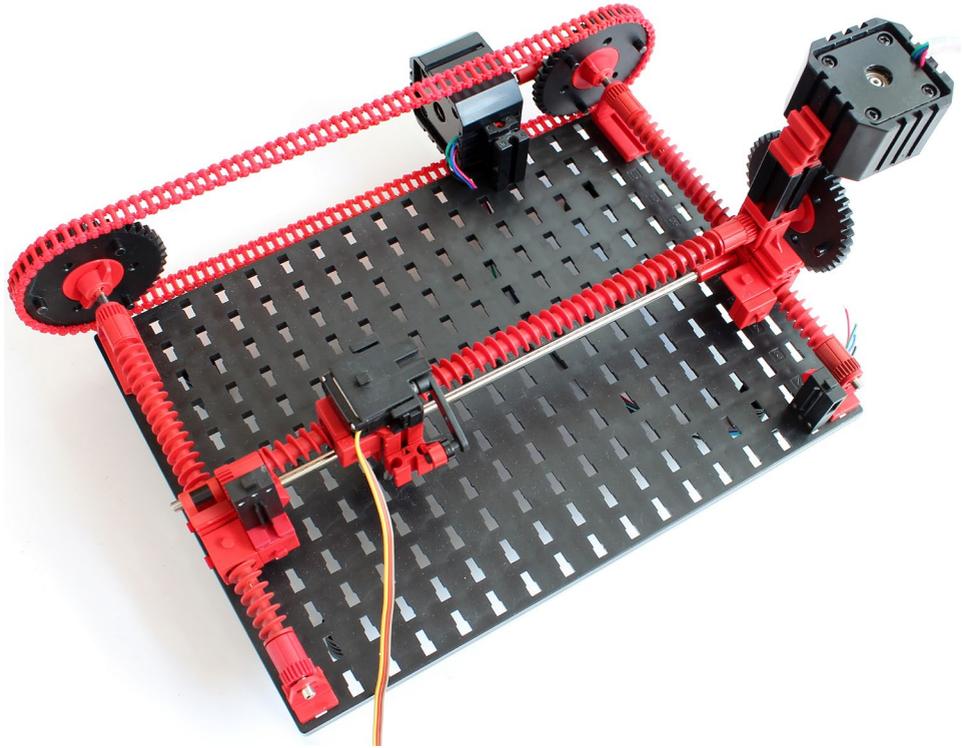


Abb. 5–22 Gesamtansicht des Plotters

5.4 Anschluss an den Arduino

Für den Betrieb des Plotters benötigen wir zunächst unseren Arduino mit einem aufgesteckten Adafruit Motor Shield. Das Motor Shield kennen wir bereits aus den vorausgegangenen Kapiteln, daher gehen wir hier nicht weiter darauf ein. Den Servomotor verbinden wir mit dem Servo-2-Anschluss (oben links auf dem Shield), damit belegen wir zugleich Pin D9.¹

Die beiden NEMA-14-Schrittmotoren schließen wir an die Motoranschlüsse M1/M2 und M3/M4 an. Dabei wird je eine Spule mit einem Motoranschluss verbunden. Bei unseren Pololu-Schrittmotoren gehören die Kabelpaare in den Farben Rot/Blau und Schwarz/Grün zu jeweils einer Spule (Abb. 5–23). Damit die Drehrichtung der Motoren stimmt, werden das rot/blau Kabelpaar des x-Achsen-Motors an M1 und das des y-Achsen-Motors an M3 angeschlossen;

¹ Der Servo-1-Anschluss belegt Pin D10, den wir für das CS-Signal der SPI-Verbindung zum SD-Kartenleser verwenden; siehe nachfolgender Text.



entsprechend verbinden wir das schwarz/grüne Kabelpaar des x-Achsen-Motors mit M2 und das des y-Achsen-Motors mit M4.

Die Endlagentaster verbinden wir mit den digitalen Pins D4 (Endlage x-Achse) und D5 (Endlage y-Achse) sowie jeweils einem GND-Pin. Pin A0 nutzen wir wie bei unserem Buggy (Kapitel 3) für den Anschluss eines Starttasters, mit dem wir den Sketch und damit den Plot einer Vektorgrafik-Datei starten können. Alle drei Pins werden bei der Initialisierung auf `INPUT_PULLUP` gesetzt. Damit liefern sie bei offenem Taster ein stabiles `HIGH`-Signal.

Mit der zusätzlichen Stiftleiste, die wir in Kapitel 4 auf unser Motor Shield gelötet haben, kommen wir mit den verfügbaren GND-Anschlüssen auch ohne eine Verteilerplatte (31327/31328) aus.

Schließlich benötigen wir noch ein Lesegerät, mit dem wir von einem Datenspeicher die zu plottende Vektorgrafik-Datei einlesen können. Wir verwenden dazu einen Micro-SD-Kartenleser², der FAT16- oder FAT32-formatierte Micro-SD-Karten (bis 2 GB bzw. 32 GB bei SDHC-Karten, *SD High Capacity*) lesen kann und via SPI (*Serial Peripheral Interface*) angesprochen wird (Abb. 5–24).

Angeschlossen wird der SD-Kartenleser am Arduino an einen GND- und einen Vcc-Pin (5V) sowie an die digitalen Pins D13 (CLK – *Clock*), D12 (DO – *Data Out*) und D11 (DI – *Data In*). Für den *Chip Select*-Anschluss (CS) verwenden wir Pin D10. Stattdessen kann der Kartenleser auch mit den sechs ICSP-Anschlusspins des Arduino verbunden werden (siehe Kapitel 2 sowie den Anschluss der Pixy-Kamera in Kapitel 3).

Den Anschluss der Schrittmotoren an das Motor Shield, die Verkabelung der Endlagentaster und die Verbindung des Micro-SD-Kartenlesers mit unserem Arduino zeigt die Schemazeichnung in Abb. 5–25.

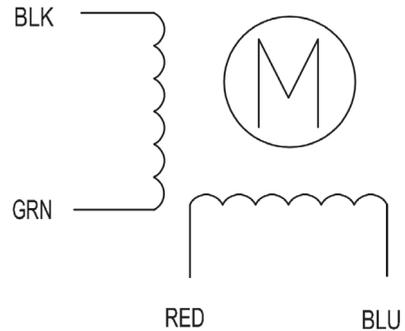


Abb. 5–23 Anschlüsse der NEMA-14-Schrittmotoren

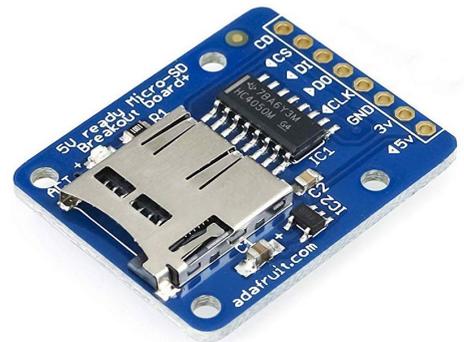


Abb. 5–24 Micro-SD-Kartenleser-Board von Adafruit mit SPI-Schnittstelle

² Wir verwenden das Adafruit Micro-SD Card Breakout Board [13]. Bezugsquellen und alternative Micro-SD-Kartenleser haben wir auf der Webseite zum Buch verlinkt.

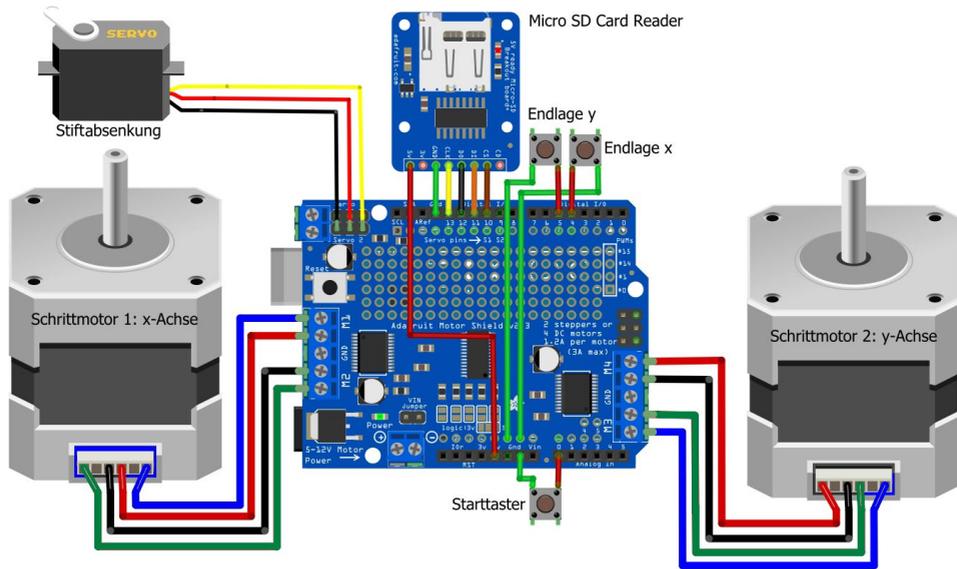


Abb. 5–25 Anschluss der Schrittmotoren, des Servos, des Start- und der Endlagentaster sowie des Micro-SD-Kartenlesers am Arduino

Die Formatierung der Micro-SD-Karte (mit FAT16 oder FAT32) und die Speicherung unserer Grafikdatei nehmen wir an einem Rechner mit SD-Schnittstelle über einen SD-Kartenadapter (Abb. 5–26) vor, der bei einigen Micro-SD-Karten bereits beiliegt.³



Abb. 5–26 Micro-SD-Karte von SanDisk mit SD-Adapter

3 Manche Micro-SD-Karten werden bereits formatiert geliefert. Wenn die Karte nicht oder mit dem falschen Format (bspw. NTFS) formatiert ist, gelingt die (Neu-)Formatierung unter Microsoft Windows am einfachsten über die Kommandozeile: Windows-Taste, dann im Suchfenster »CMD« eingeben. Die Formatierung erfolgt mit dem Befehl `format`; die Eingabe von `format /?` liefert eine Beschreibung der benötigten Parameter. Wenn die Micro-SD-Karte unter dem Laufwerksbuchstaben `z:` erreichbar ist, lautet das Kommando `format z: /FS:FAT /V:Plotter /Q` oder `format z: /FS:FAT32 /V:Plotter /Q`. **Achtung:** Beim Formatieren werden alle zuvor auf der Micro-SD-Karte gespeicherten Daten gelöscht!