

Modell

Strandbeester

Benjamin Klingebiel

Strandbeester sind vom niederländischen Künstler Theo Jansen entwickelte Laufmaschinen, die sich, vom Wind angetrieben, fortbewegen. In diesem Beitrag erkläre ich die zu Grunde liegende Beinmechanik und stelle zwei verschiedene Varianten zum Nachbau aus fischertechnik-Teilen vor.

Einleitung

Seit 1990 lassen sich bevorzugt an niederländischen Stränden teils riesige skelett-artige Gebilde beobachten, die sich angetrieben von Segeln oder Windrädern mittels einer Vielzahl von mechanischen Beinen fortbewegen (Abb. 1). Entwickelt werden diese kinetischen Kunstwerke vom niederländischen Künstler Theo Jansen. Er sieht seine Arbeit als evolutionären Prozess, bei dem er seine Wesen stetig weiterentwickelt, damit sie sich irgendwann am Strand unter wechselnden Umgebungsbedingungen (Fluten, Stürme und Flauten) eigenständig bewegen

können. Seine neueren Modelle verwenden u. a. Druckluftspeicher, um Windenergie zu speichern und sich so bei Flauten fortzubewegen und können sich selbst bei Sturm im Sand verankern. Über einfache Sensoren nehmen sie ihre Umgebung wahr und können z. B. ihre Richtung ändern, sobald sie ins Wasser laufen [2]. Zum Bau der Konstruktionen verwendet er fast ausschließlich Kunststoffrohre aus PVC, die sonst für Elektroinstallationen verwendet werden. Diese bringt er unter Zuhilfenahme von Heißluftföhn und vielen Kabelbindern in Form.



Abb. 1: Strandbeest Plaudens Vela (Höhe 2 m), gebaut von Theo Jansen ©, 2017, Screenshot aus youtube-Video reproduziert mit freundlicher Genehmigung des Künstlers [1].

Inzwischen haben seine Werke große Aufmerksamkeit erregt und sind in zahlreichen Medien und Dokumentationen gezeigt worden (bis zu den Simpsons [3]). Genauso hat die Faszination für die Strandbeester viele Hobbykünstler zu Nachbauten und Miniaturmodellen inspiriert. Bei einem Vortrag im Rahmen der TED-Talks hat Theo Jansen dies als „Fortpflanzungsmethode“ der Strandbeester bezeichnet, die durch unsere Nachbauten in immer neuen Varianten geboren werden [4]. Es ist also an der Zeit, dass ein Strandbeest auch aus fischertechnik-Teilen entsteht.

Die Beinmechanik

Das gemeinsame Merkmal vieler Generationen von Strandbeestern ist die einzigartige Beinmechanik, die von Theo Jansen entwickelt wurde. Diese dient dazu Bewegungsenergie aus einer rotierenden Welle (angetrieben durch ein Windrad, Druckluft oder die Flatterbewegung eines Segels) in eine gleichmäßige Vorwärtsbewegung der Füße umzuwandeln.

Die Beinmechanik in den Original-Proportionen ist in Abb. 2a abgebildet. Diese besteht aus einem System von acht beweglich miteinander verbundenen Gliedern, welches über zwei weitere Glieder mit einer Kurbel verbunden ist. Das Gelenksystem ist an zwei Fixpunkten (blau markiert) aufgehängt. Der rechte Teil ist ein System von zwei Kurbelschwingen (fett gezeichnet), welches sich entlang von Kreisbögen bewegt (K_1 und K_2 grau gepunktet).

Durch die Kopplung über zwei zusätzliche Gelenke G_1 und G_2 führt nun eine gleichmäßige Kreisbewegung der Kurbel (oberer grüner Punkt) zu einer komplexen abgeflachten Bewegungskurve des „Fußes“ (unterer grüner Punkt).

Das Besondere der Konstruktion ist, dass sich der Fuß über eine längere Strecke horizontal und mit gleichmäßiger Geschwindigkeit bewegt. Umgekehrt kann dies zur Vorwärtsbewegung der ganzen Konstruktion parallel zum Erdboden verwendet werden.

Entscheidend für die optimale Form der Bewegungskurve ist das Längenverhältnis der zehn Glieder zueinander und zur Länge der Kurbel, sowie die Positionen der Kurbel und des zweiten Fixpunkts (blaue Punkte).

Die Abhängigkeit der Form der Bewegungskurve von den Längenverhältnissen der Glieder ist mathematisch nicht trivial. Aus diesem Grund hat Theo Jansen die Längenverhältnisse nicht berechnet, sondern durch einen evolutionären Algorithmus optimiert, bei dem ein Simulationsprogramm ausgehend von willkürlich gewählten Längenverhältnissen zufällige Änderungen vornahm und dann die Bewegungskurve analysierte. Vorteilhafte Änderungen wurden dann in der nächsten Generation weiterverwendet.

Dieses Optimierungsverfahren resultierte in den in Abb. 2a dargestellten Längenverhältnissen, die von Theo Jansen als elf „heilige“ Zahlen bezeichnet werden. (Die Kurbellänge skaliert dabei das gesamte System und die Position der zwei blauen Fixpunkte wird nur durch ihre Distanz ausgedrückt.)

Diese Beinmechanik wird von ihm seitdem zum Bau der Strandbeester verwendet. Ein wesentlicher Vorteil ist, dass diese Mechanik auf glattem Untergrund zu einer energieeffizienten Fortbewegung verwendet werden kann, weil der Körper der Strandbeester beim Gang keine Auf- und Ab-Bewegung durchführt (wie es bei Zweibeinern der Fall ist).

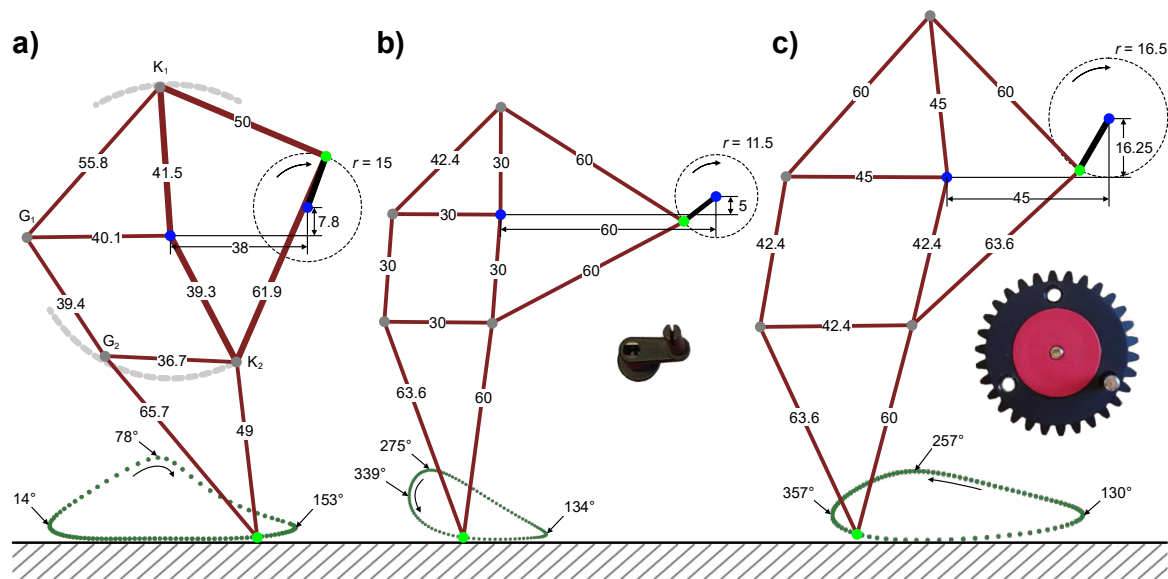


Abb. 2: Geometrie der von Theo Jansen entwickelten Beinmechanik und resultierende Bewegungskurven der Füße bei Kreisbewegung der Kurbeln (grüne Punkte). a) Optimierte Proportionen des Original-Strandbeests. b) Realisierung mit fischertechnik Statik-Streben und Rastkurbel. c) Realisierung mit Zahnrad Z30. Simulationen mit Geogebra [2].

Nachbau mit fischertechnik

Für den Nachbau der Beine mit fischertechnik bieten sich Statikstreben aufgrund ihres geringen Gewichts an. Zur Bewegung der Streben wurden zunächst Rastkurbeln ([35071](#) u. [35088](#)) verwendet (Version 1). In einem weiteren Nachbau (Version 2) wurden stattdessen Zahnräder Z30 ([36264](#)) mit daran befestigten Achsen als Kurbeln verwendet. Aufgrund der unterschiedlichen Kurbelradien (11,5 mm für die Rastkurbeln, bzw. 16,5 mm für die Zahnräder) ergeben sich unterschiedliche Dimensionen der Beine: Hierzu wurden die Originalproportionen aus Abb. 2a mit den jeweiligen Kurbelradien skaliert und die resultierenden krummen Maße der Beinsegmente durch die verfügbaren Längen der fischertechnikstreben soweit wie möglich angenähert.

Da die Proportionen der Beine nun nicht mehr der von Theo Jansen optimierten Geometrie entsprechen, ergeben sich abweichende Bewegungskurven, die mit Hilfe von Geogebra [2] simuliert wurden und in Abb. 2b und c dargestellt sind. Mit Hilfe der Software wurde nun die Geometrie durch

Variation der Strebenlängen soweit wie möglich optimiert, sodass sich eine unten möglichst flache Bewegungskurve ergibt.

Etwas mehr Spielraum als es die Strebenlängen ermöglichen erlaubte die Verschiebung der Achsen (blaue Punkte in Abb. 2) durch Einbau unterschiedlicher Bausteine an den Lagern von Kurbel und Achse. Hierdurch konnte zumindest die Bewegungskurve soweit rotiert werden, dass sich die Füße möglichst parallel zum Boden bewegen.

Aufgrund des zu erwartenden Gelenkspiels der Konstruktion und der unvermeidlichen Verbiegung der Streben unter Belastung, wurde zudem darauf geachtet, dass die Amplitude der Bewegungskurve nicht zu gering ist. Dadurch sollte vermieden werden, dass die Füße insbesondere im rechten Umkehrpunkt über den Boden schleifen. Um dies zu erreichen, wurde bei der Konstruktion in Abb. 2c die Kurbelachse etwas mehr angehoben, als es anhand der Bewegungskurve nötig erscheint. Dies zeigt, dass Simulationen immer auch durch Experimente ergänzt werden sollten.

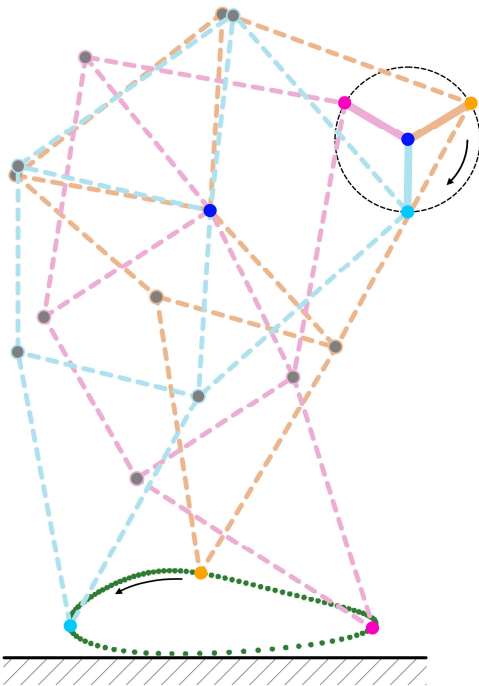


Abb. 3: Beinpositionierung bei Veränderung der Kurbelstellung in 120°-Schritten für die Geometrie aus Abb. 2 c. Simulation mit Geogebra. [2]

In Abb. 3 ist die Stellung eines Beins aus Abb. 2c in Abhängigkeit vom Winkel der Kurbel in 120° Schritten abgebildet. Aus der Position des hellblauen und des pinken Punkts ist ersichtlich, dass der Fuß sich bei einem Winkelabschnitt der Kurbel $< 120^\circ$ im unteren Bereich der Bewegungskurve befindet. Damit mindestens immer ein Fuß gerade eben noch den Boden berührt, müssen also drei Beine mit einem Winkelversatz von 120° kombiniert werden. Da das Gewicht der Konstruktion aber auf möglichst viele Beine verteilt werden sollte, damit diese nicht abknicken, sollte das fischertechnik-Strandbeest möglichst mehr als drei Beine auf jeder Seite besitzen und der Kurbelversatz sollte geringer gewählt werden (z. B. $4 \cdot 90^\circ$ oder $6 \cdot 60^\circ$). Zum Vergleich ist bei der Originalgeometrie aus Abb. 2a der Winkelabschnitt, in dem der Fuß im horizontalen Bereich ist, größer als 200° . Daher benötigt das Original-Strandbeest weniger Beine, bzw. das Gewicht verteilt sich immer gleichzeitig auf mehr Füße.

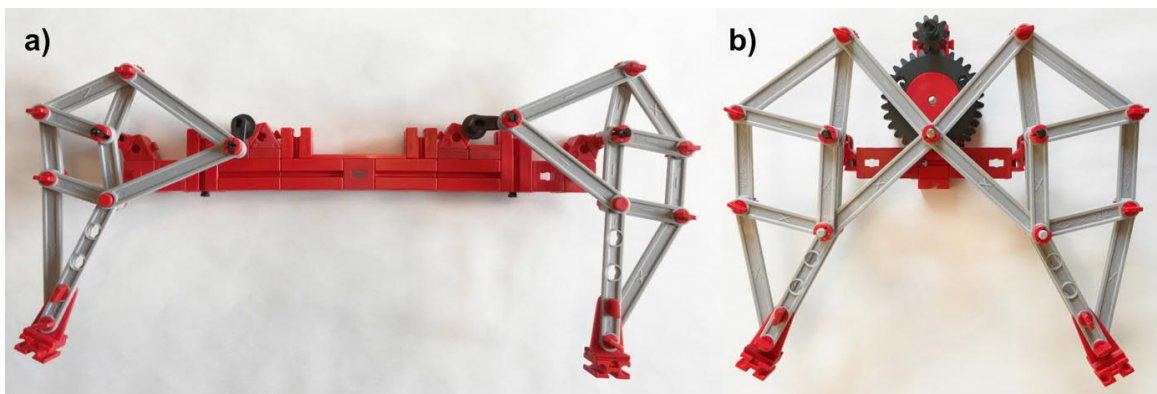


Abb. 4: Aufbau eines Beinpaars basierend auf der Geometrie aus Abb. 2b (a) und Abb. 2c (b).

Abb. 4 zeigt den Aufbau je eines Beinpaars für die fischertechnik-Strandbeester-Version 1 (a) und 2 (b) basierend auf den optimierten Geometrien aus Abb. 2. Für Version 1 mit den Rastkurbeln wurde eine breite Konstruktion mit je einer Kurbelwelle für die Beine auf der linken und rechten Seite verwendet. Dadurch steht in der Mitte genügend Platz für den Antrieb zur

Verfügung. Version 2 mit den Zahnradern Z30 als Kurbeln verwendet eine gemeinsame Kurbelwelle für alle Beine. Diese Konstruktion ist näher an dem Vorbild von Theo Jansen. Nachteil ist, dass der Antrieb nun über der Kurbelwelle Platz finden muss. Dadurch ist der Schwerpunkt höher und die ganze Konstruktion etwas wackeliger. Für die Beine aus Statikstreben wurden

S-Riegel 8 ([36457](#)) mit Riegelscheiben für alle Gelenke an denen drei Streben verbunden sind, verwendet. Für den Verbindungspunkt der vier Streben wurde in Version 1 ein V-Bolzen ([31690](#)) + Klemmbuchse verwendet. Wenn mehr Teile zur Verfügung stehen, können die Statikstreben, die sich an diesem Punkt treffen, auch doppelt ausgeführt werden, um die Stabilität zu erhöhen. Dann muss stattdessen hier eine Achse 30 mit Klemmbuchsen verwendet werden.

Dies erfolgte bei Version 2 (Abb. 4b). Es empfiehlt sich alle beweglichen Verbindungen zu schmieren (z. B. mit Silikonöl), da sich die Reibungsverluste bei vielen angetriebenen Beinen addieren. Die Füße sind schließlich aus je einem dreifachen Kuppelungsstück ([38260](#)) und Baustein 7,5 gebaut. Federnocken verhindern, dass die Kuppelungsstücke aus den Bausteinen rutschen.

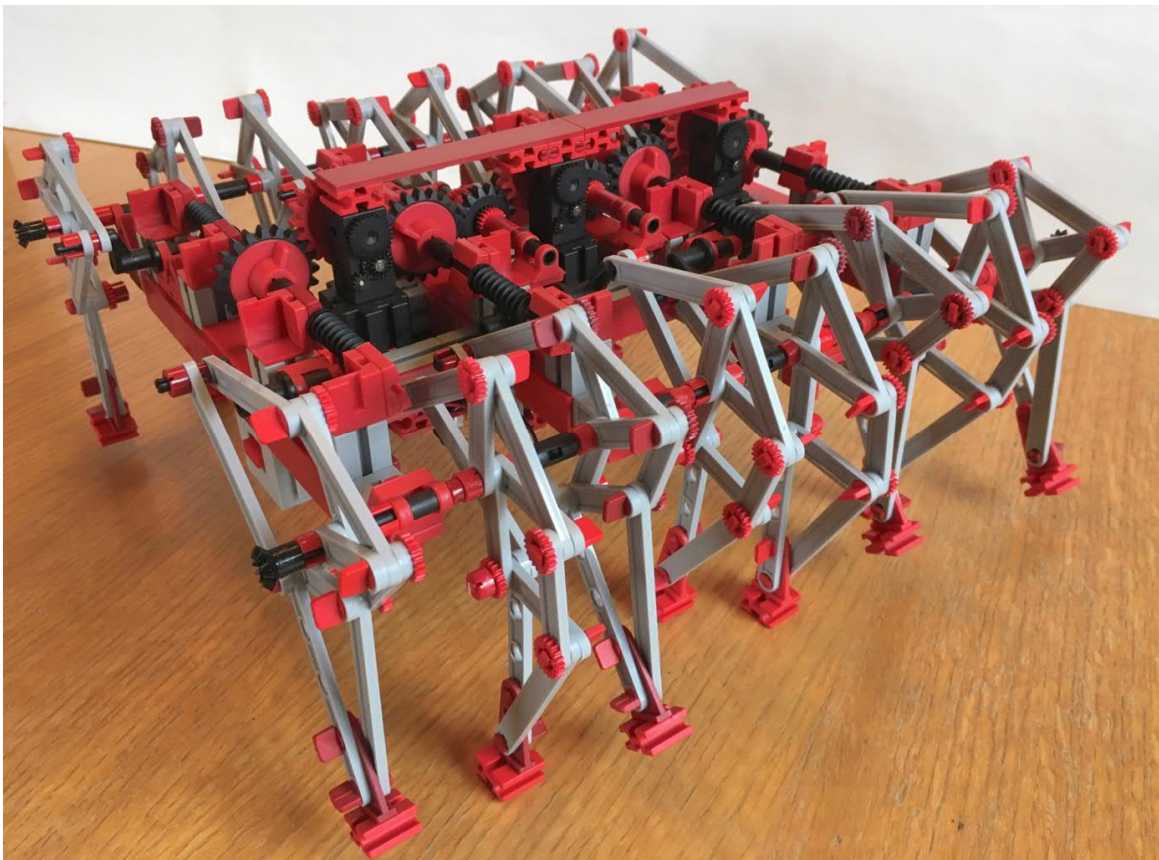


Abb. 5: fischertechnik-Strandbeest (Version 1) mit acht Beinpaaren (Aufbau Abb. 4 a), angetrieben von drei S-Motoren.

Abb. 5 zeigt den kompletten Aufbau eines Strandbeests Version 1 mit acht Beinpaaren. Details des Kurbelantriebs sind in Abb. 6 ersichtlich. Je eine doppelte Kurbel aus [35071](#) u. [35088](#) wird durch eine Rastschnecke mit Zapfen ([35977](#)) angetrieben (gelagert in Winkelsteinen 15°). Eine unvermeidliche Schwachstelle sind die sehr kurzen Kurbelachsen, die sich inklusive der Gelenkwürfelklaue unter Belastung leicht

verbiegen. Aus diesem Grund ist die Gelenkwürfelklaue durch eine Bauplatte $15 \cdot 15$ (in Abb. 6 darunter erkennbar) leicht eingeklemmt. Weitere Bauplatten $15 \cdot 45$ (Abb. 4a in der Mitte) verhindern, dass die gesamte Lagerung der Antriebswelle sich verschiebt. Für die lange unbewegliche Achse der Beinlagerung wird in dieser Konstruktion eine gestückelte Rastachse als Kompromiss aus Gewicht und

Stabilität verwendet. Insbesondere wenn stärkere Motoren eingesetzt werden (s. u.) kann an dieser Stelle aber auch durch Einsatz einer langen Metallachse die Steifigkeit der gesamten Konstruktionen erhöht werden.

Zum Aufbau ist noch zu erwähnen, dass alle Beine exakt identisch und so aufgebaut werden sollten, dass die Streben gerade bezüglich der Laufrichtung stehen, damit das Bein auch unter Belastung möglichst senkrecht steht und nicht seitlich wegknickt. Um dies zu erreichen wurden unterschiedliche Klemmbuchsen und Distanzringe verwendet (Abb. 6).

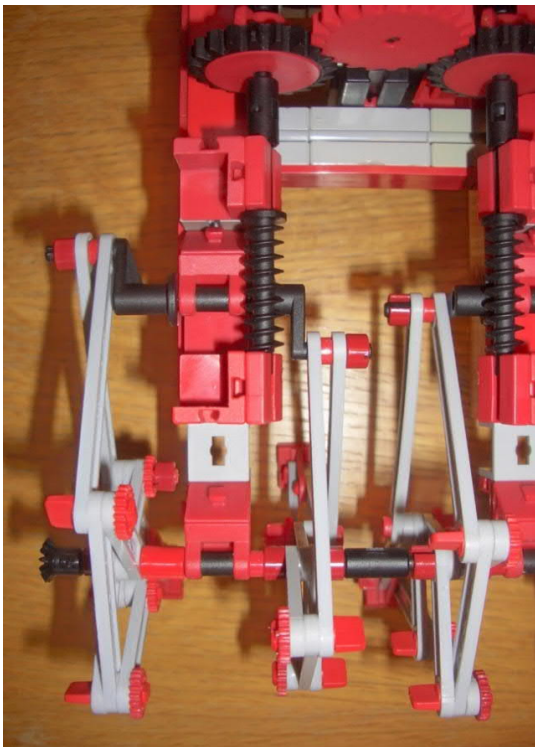


Abb. 6: Detail des Kurbelantriebs des Strandbeests aus Abb. 5.

Zum Antrieb wurden in Version 1 drei über Zahnräder synchronisierte S-Motoren verwendet (als Kompromiss zwischen Gewicht und Leistung). Details der Motorisierung zeigt Abb. 7. Vor Einbau der roten Zahnräder an den Motoren wurde die Kurbel eingestellt. Wie oben erklärt wurde jede Achse jeweils um 90° verdreht. (Beim Nachbau beachten, dass die Motoraufhängung um die

Dicke einer Bauplatte 15 · 45 nach oben in Abb. 7 versetzt ist, damit die schwarzen Zahnräder Z20 nicht an den Motorblöcken schleifen.) Damit läuft das Strandbeest auf glattem Boden sehr gut (Video [6]). Alternativ bietet die Konstruktion aber auch genügend Platz für den Antrieb durch einen (schwereren) XM- oder Traktormotor (Video [7]).

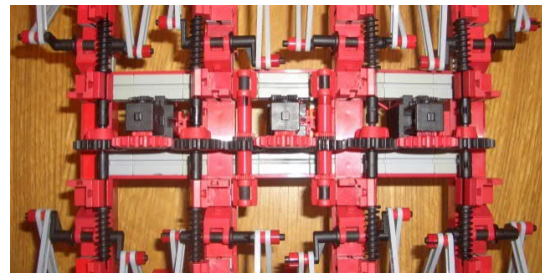


Abb. 7: Detail der Motorisierung des Strandbeests aus Abb. 5.



Abb. 8: fischertechnik-Strandbeest (Version 2) mit acht Beinpaaren (Aufbau Abb. 4 b), angetrieben von zwei S-Motoren.

Version 2 des fischertechnik-Strandbeests wurde mit Zahnrädern Z30 als Kurbeln aufgebaut. Abb. 8 zeigt den kompletten Aufbau mit acht Beinpaaren aus Abb. 4b. Der offensichtliche Vorteil dieser Konstruktion ist, dass der Rahmen leichter ist und viel weniger Teile benötigt werden.

Abb. 9 zeigt eines der vier Kurbellager. Auch bei Version 2 tendieren die Kurbelachsen inkl. Lager dazu sich unter Belastung zu verbiegen. Deswegen sollte der Lagerbaustein 15 möglichst stabil umbaut werden.

Alternativ kann auch eine Schneckenmutter (35973) mit Kugellager zur Verringerung der Reibung verwendet werden. Sinnvoll ist außerdem die Verwendung einer Metallachse 40, die leider nur im Zubehörhandel erhältlich ist [8].

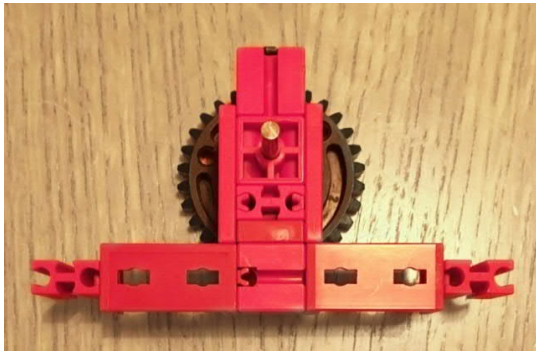


Abb. 9: Detail des Kurbellagers des Strandbeests aus Abb. 8.

Für das Grundgestell werden vier dieser Lager zusammengefügt (Abb. 10). Als eigentliche Kurbeln dienen Metallachsen 30.

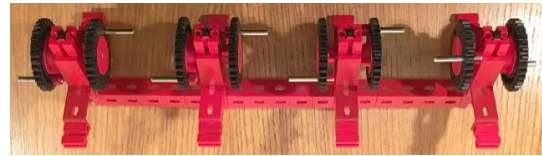


Abb. 10: Grundgestell des Strandbeests aus Abb. 8.

Auch bei dieser Konstruktion tragen die fixen Achsen wesentlich zur Gesamtstabilität bei. Die Beine werden durch Klemmbuchsen und Distanzhülsen fixiert (Abb. 11). Der Winkelversatz wurde bei Version 2 so eingestellt, dass jedes Zahnrad um 60° weitergedreht wird. Dadurch ergibt sich ein möglichst gleichmäßiger Geradeauslauf.

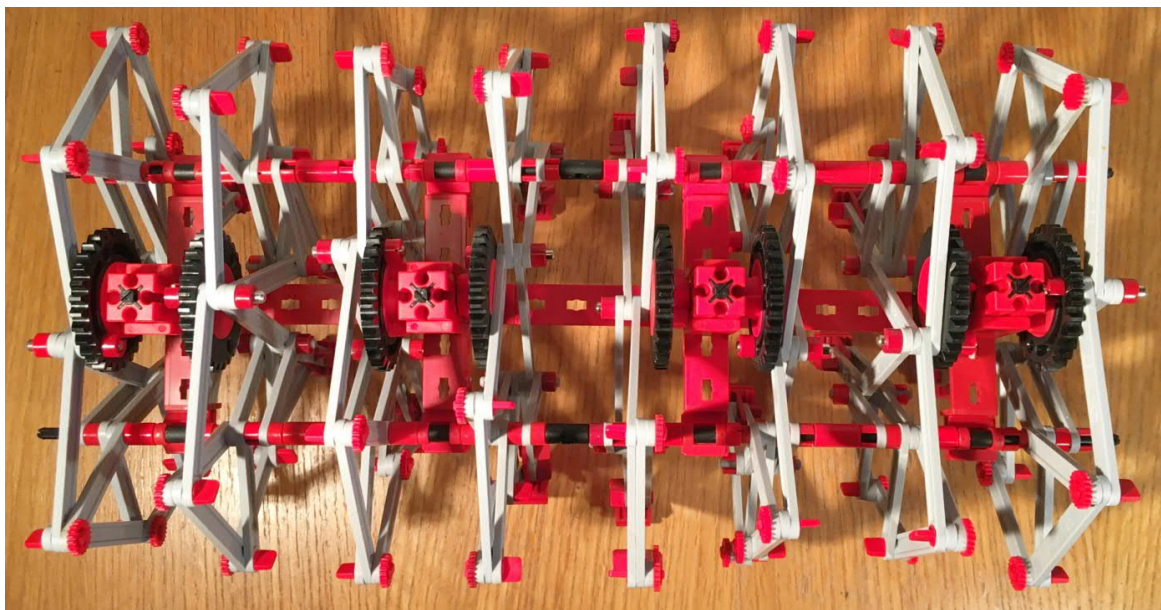


Abb. 11: Aufsicht des Strandbeests aus Abb. 8 mit demontiertem Antrieb zur Einstellung der Kurbeln.

Zum synchronen Antrieb aller acht Zahnräder Z30 wurde eine gestückelte Rastachse mit Rastritzeln Z10 verwendet (Abb. 8). Der Antrieb erfolgt über zwei S-Motoren mit Schneckenantrieb über Z20, die gerade ausreichend Kraft liefern. Aufgrund des hohen Schwerpunkts waren Versuche mit einem leistungsstärkeren XM-Motor leider nicht erfolgreich. Der Vorteil der kleinen

Standfläche ist allerdings, dass das Strandbeest Version 2 mit den zwei S-Motoren im Prinzip lenkbar ist. Dafür werden einfach die mittlere Rastachse unter dem Akku in Abb. 8 entfernt und die Motoren über einen IR- oder Bluetooth-Empfänger angesteuert. (Da jede Antriebseinheit nur noch aus vier Beinpaaren besteht, sollte der Winkelversatz der Z30 dabei auf 90° eingestellt werden.)

Dann lässt sich das Strandbeest (auf Kosten eines gleichmäßigen Geradeauslaufs) über die Fernbedienung lenken. Insbesondere die Drehung auf der Stelle (bei voller Leistung beider Motoren in entgegengesetzter Richtung) funktioniert auf glatter Fläche hervorragend (Video [9]).

In diesem Beitrag habe ich die Beinmechanik der von Theo Jansen entwickelten Laufmaschinen vorgestellt und gezeigt, wie sich die Bewegung mit Hilfe von Geometriesoftware wie Geogebra [5] optimieren lässt. Anschließend wurden zwei verschiedene motorisierte Strandbeester aus fischertechnik nachgebaut, die auf ebener Fläche laufen und einen Eindruck von der Faszination der großen Vorbilder geben.

Wie bei den großen Exemplaren des Künstlers durchlaufen auch die Modelle eine ständige Weiterentwicklung. So ist es möglich, dass sich auch unter ausschließlicher Verwendung von fischertechnik-Teilen noch bessere Ergebnisse erzielen lassen, z. B. durch Ersatz der biegsamen Statikstreben durch andere Bauteile. Zuletzt ist die hier verwendete Beinmechanik auch nur eine

Variante von vielen Möglichkeiten, eine Fortbewegung nach biomechanischem Vorbild zu erzielen.

Quellen

- [1] Screenshot: [Strandbeest Plaudens Vela](#), Theo Jansen.
- [2] Website: [Theo Jansens Explains](#).
- [3] Die Simpsons: [S28, E10](#).
- [4] Teo Jansen: [Vortrag TEDx Delft](#), 06.11.2011.
- [5] [Geogebra Geometrie-Simulator](#)
- [6] Video: [Strandbeest Version 1](#).
- [7] Video: [Strandbeest Version 1, mit Powermotor](#).
- [8] Bezugsquelle für [Metallachsen und Kugellager](#).
- [9] Video: [Strandbeest Version 2](#).
- [10] Ralf Geerken: [Die Geradführung einer Viergelenkkette im Einsatz bei einer kleinen Laufmaschine](#). ft:pedia 4/2012, S. 4-10.