8

Lego-Rezepte

In diesem Kapitel lernst du die Grundlagen der Lego-Geometrie kennen. Dadurch erfährst du, wie du stabile Konstruktionen und funktionierende Zahnradgetriebe bauen und Bewegungen übertragen und umwandeln kannst. Außerdem findest du hier einige Anregungen für den Einsatz von EV3-Motoren.

Die geheimen Eigenschaften von Winkelbalken

Wie du weißt, ist die »grundlegende Lego-Einheit« (also die Lochbreite) das Maß aller Dinge im Lego-Technic-System. Die Abmessungen jedes einzelnen Bauteils sind auf diese Maßeinheit ausgelegt, und die Winkelbalken bilden dabei keine Ausnahme. Ihre Geometrie ist allerdings nicht unmittelbar einleuchtend. Die Form der Winkelbalken mit den Abmessungen 2×4 und 3×5, der T-Balken und der Doppelwinkelbalken leuchtet noch ein, da sie rechte Winkel (90°) und halbe rechte Winkel (45°) aufweisen. Aber was ist mit den anderen Winkelbalken? Warum haben sie Knicke in so komischen Winkeln?

Abbildung 8-1 zeigt als Beispiel einen 3×7-Winkelbalken. Das darüber eingezeichnete Dreieck besitzt unten rechts einen rechten Winkel, und seine Seiten messen in Lego-Einheiten 3L, 4L und 5L. (Ich messe die Länge hier von Lochmittelpunkt zu Lochmittelpunkt. Da ich deswegen an jedem Ende eine halbe Einheit abziehe, entsprechen die sechs Löcher 5L.)

Der mit α (Alpha) bezeichnete Winkel kommt dadurch zustande, dass dieser Balken von Lego so gestaltet wurde, dass er in die Geometrie des Lego-Technic-Systems passt. Das gleiche Dreieck kannst du auch bei den 4×6- und 4×4-Winkelbalken erkennen.

Der Satz des Pythagoras (siehe Abbildung 8-2) besagt, dass in einem rechtwinkligen Dreieck die Fläche des Quadrats über der Hypotenuse (der Seite gegenüber dem rechten Winkel) gleich der Summe der Flächen der Quadrate über den beiden Seiten ist, die sich im rechten Winkel treffen (Katheten).

Die beiden Katheten des Dreiecks in Abbildung 8-1 messen 3 und 4 Einheiten. Die Quadrate darüber weisen daher eine Fläche von 3×3 = 9 und 4×4 = 16 auf, zusammen also 9 + 16 = 25. Daher muss

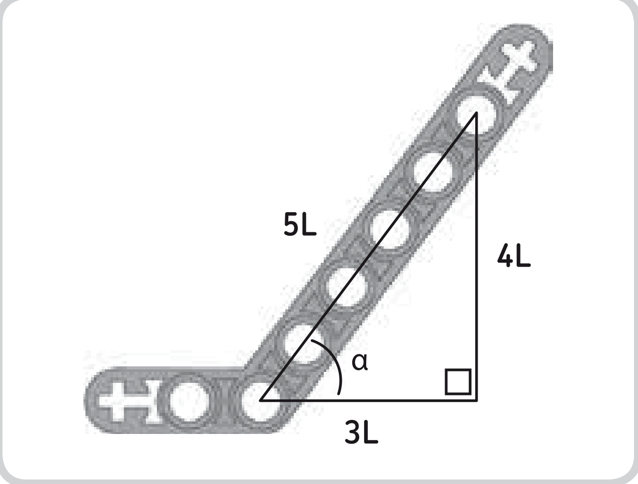


Abbildung 8-1: Geometrie eines Lego-Winkelbalkens

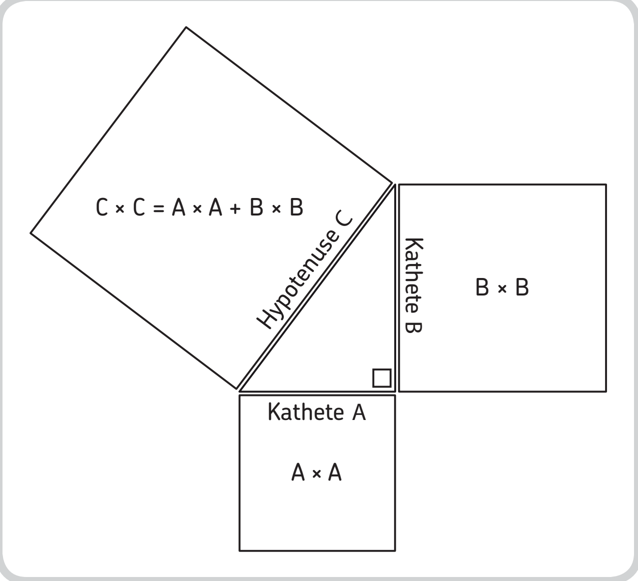


Abbildung 8-2: Grafische Darstellung des Satzes von Pythagoras

HINTERGRUNDWISSEN:
EIN LDRAW-RÄTSEL IST GELÖST!

Wie groß ist der Winkel α? Da das 3-4-5-Dreieck aus Abbildung 8-1 rechtwinklig ist, gilt: $\alpha = \arctan(4/3) \approx 53{,}13°$. Diese Zahl hast du vielleicht schon einmal gesehen. Damit werden nämlich die Winkelbalken im CAD-Programm LDraw bezeichnet. Jetzt weißt du, woher diese Zahl kommt!

die Hypotenuse 5 Einheiten lang sein, denn das ist die Quadratwurzel von 25. (Es heißt übrigens, dass die alten Ägypter diesen Trick schon lange vor Pythagoras kannten und rechtwinklige Dreiecke aus aneinandergeknoteten Seilen auslegten, um Grenzen von Ländereien festzulegen.)

Dreiecke versus Vierecke

Es gibt einen erheblichen Unterschied zwischen viereckigen und dreieckigen Strukturen. Wie Abbildung 8-3 zeigt, lässt sich ein Parallelogramm ganz einfach zusammendrücken, wenn du Kraft darauf ausübst. Eine dreieckige Struktur wie die aus Abbildung 8-4 dagegen kann Kräften widerstehen, ohne dass sie sich verformt. Aus diesem Grund sind Brücken und viele Tragstrukturen aus Dreiecksgittern zusammengesetzt, und aus demselben Grund solltest auch du für Lego-Modelle, die widerstandsfähig gegenüber Krafteinwirkungen sein müssen, dreieckige Strukturen verwenden.

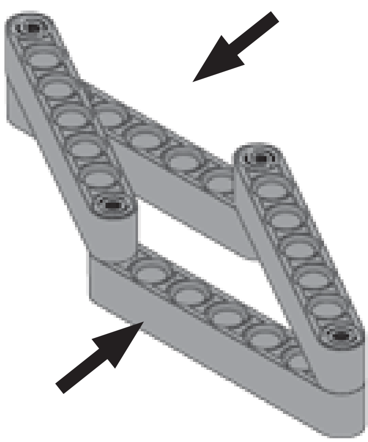


Abbildung 8-3: Wenn du Kraft auf ein Parallelogramm ausübst, kannst du es ganz leicht zusammendrücken.

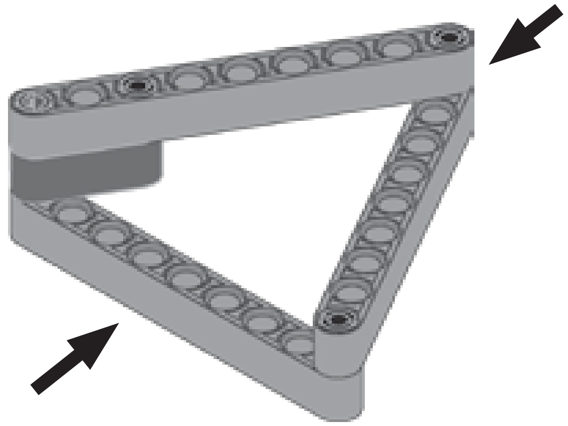


Abbildung 8-4: Eine dreieckige Struktur kann Kräften ohne Verformung widerstehen.

Ist es möglich, starke viereckige Strukturen zu bauen? Wenn du einen rechteckigen Rahmen konstruieren musst, der genauso unempfindlich gegenüber Druck ist wie ein dreieckiger, kannst du einfach einen diagonalen Balken hinzufügen wie in Abbildung 8-5. Im Grunde genommen hast du damit zwei Dreiecksstrukturen gebaut. (Der diagonale Balken entspricht der Hypotenuse des Dreiecks aus Abbildung 8-1.)

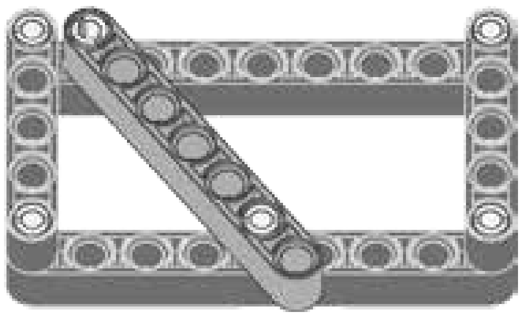
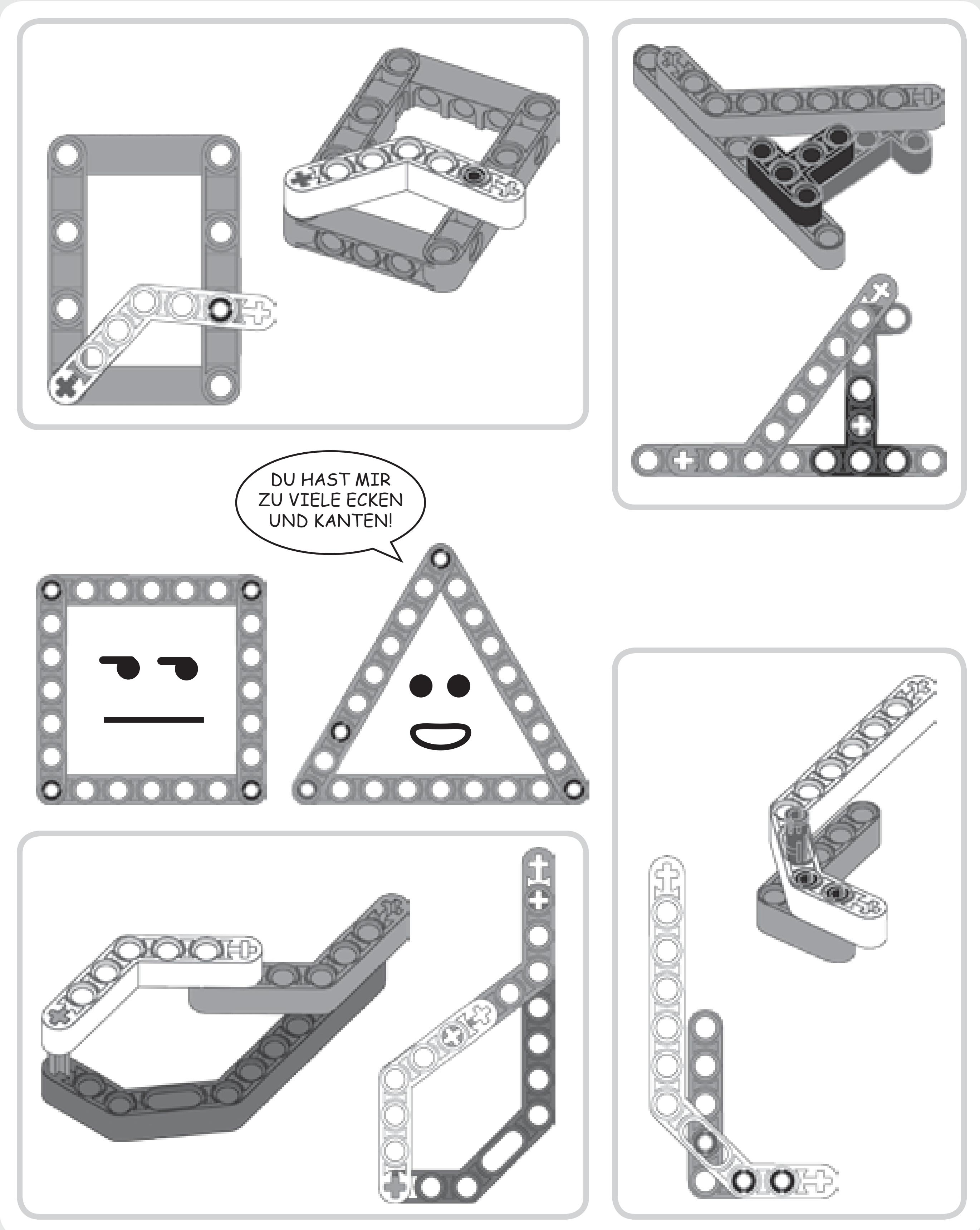
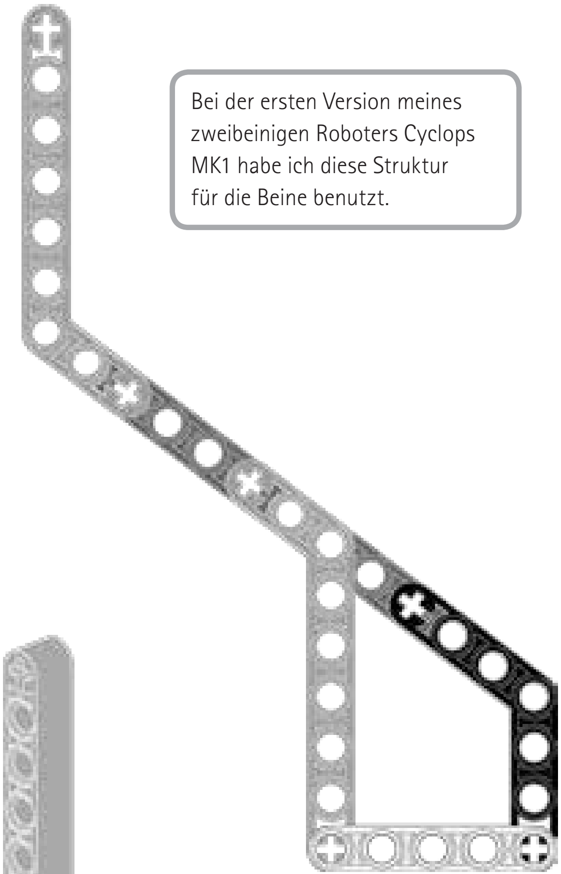


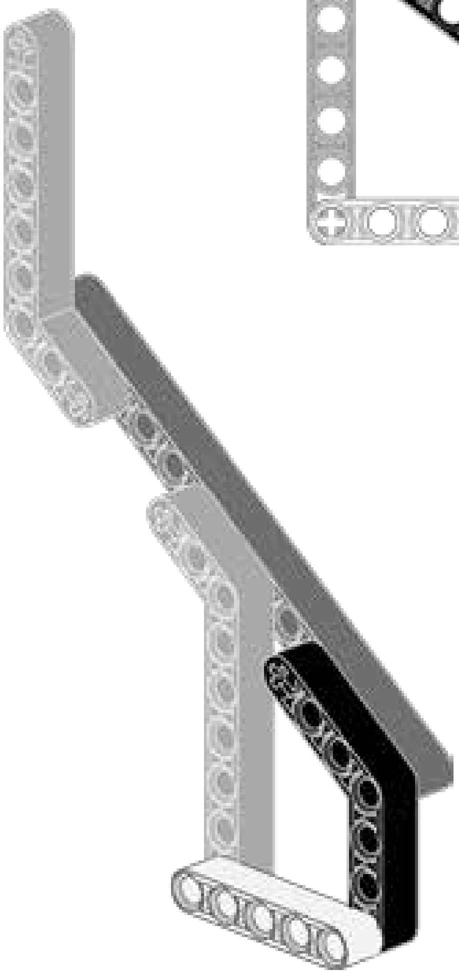
Abbildung 8-5: Ein zusätzlicher diagonaler Balken erhöht den Widerstand einer rechteckigen Struktur gegen Krafteinwirkungen. Mit diesem Balken besteht die Konstruktion praktisch aus zwei Dreiecken.

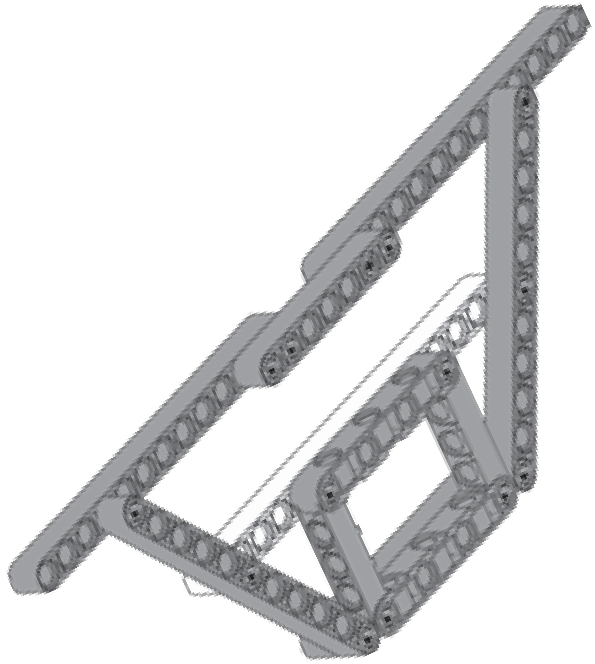
Die folgenden Beispiele zeigen dir, wie du Winkelbalken und Dreiecksstrukturen einsetzen kannst, um solide Konstruktionen zu bauen.


DU HAST MIR
ZU VIELE ECKEN
UND KANTEN!

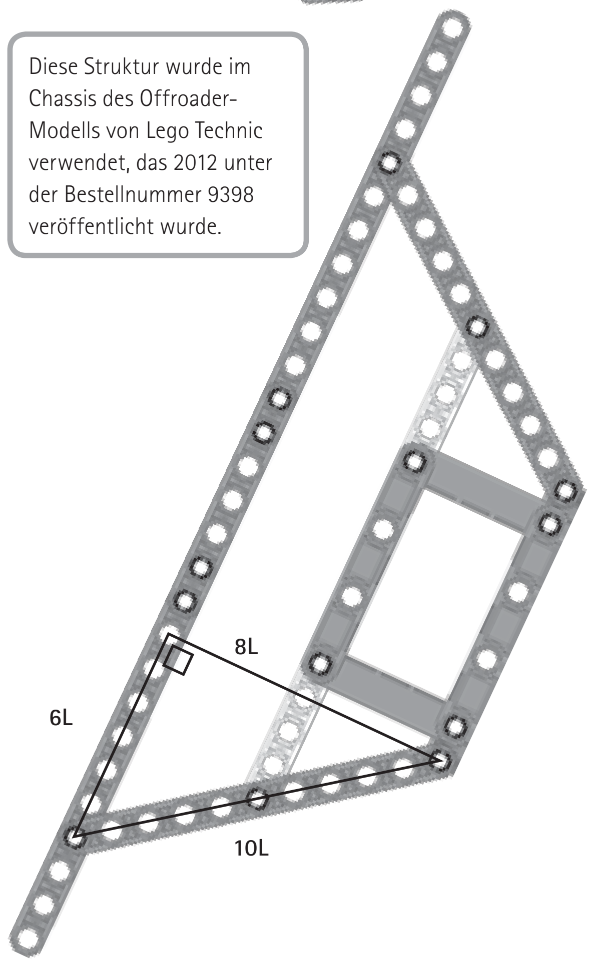


Bei der ersten Version meines zweibeinigen Roboters Cyclops MK1 habe ich diese Struktur für die Beine benutzt.



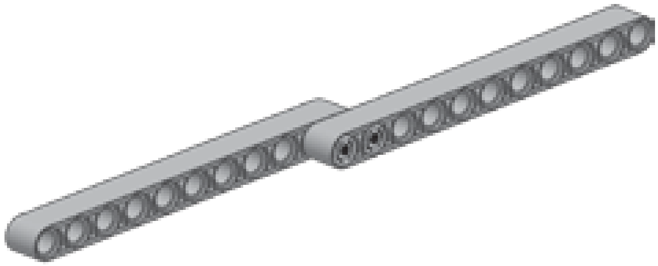


Diese Struktur wurde im Chassis des Offroader-Modells von Lego Technic verwendet, das 2012 unter der Bestellnummer 9398 veröffentlicht wurde.

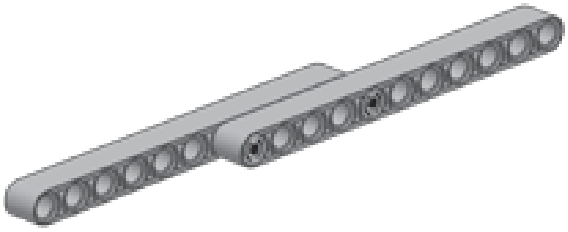


Balken verlängern

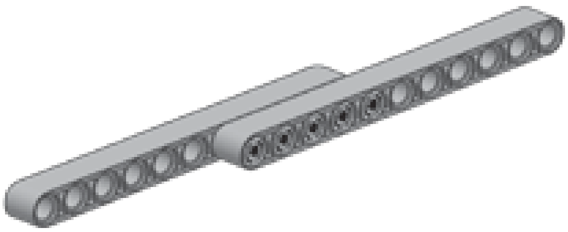
Wenn du Balken verlängern musst, kannst du zwei oder mehr von ihnen über Pins mit Reibung (die schwarzen oder die langen blauen) verbinden. Abbildung 8-6 zeigt verschiedene Möglichkeiten, um Balken zu verlängern und Strukturen stabiler zu machen.



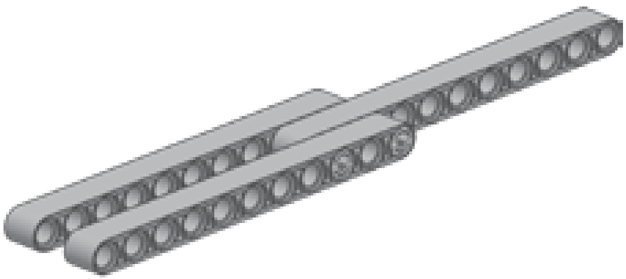
Diese beiden Balken sind mit schwarzen Pins verbunden und überlappen sich nur über zwei Löcher. Diese Konstruktion ist zwar gerade, aber immer noch biegsam.



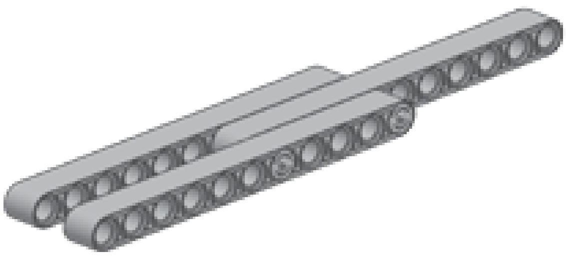
Eine Verlängerung der Überlappung auf fünf Löcher macht die Konstruktion fester.



Zusätzliche Pins können dafür sorgen, dass die Balken besser zusammenhalten. Gewöhnlich ist dies aber nicht notwendig.



Du kannst die langen blauen Pins verwenden, um die Konstruktion dicker zu machen und dadurch zu verstärken.



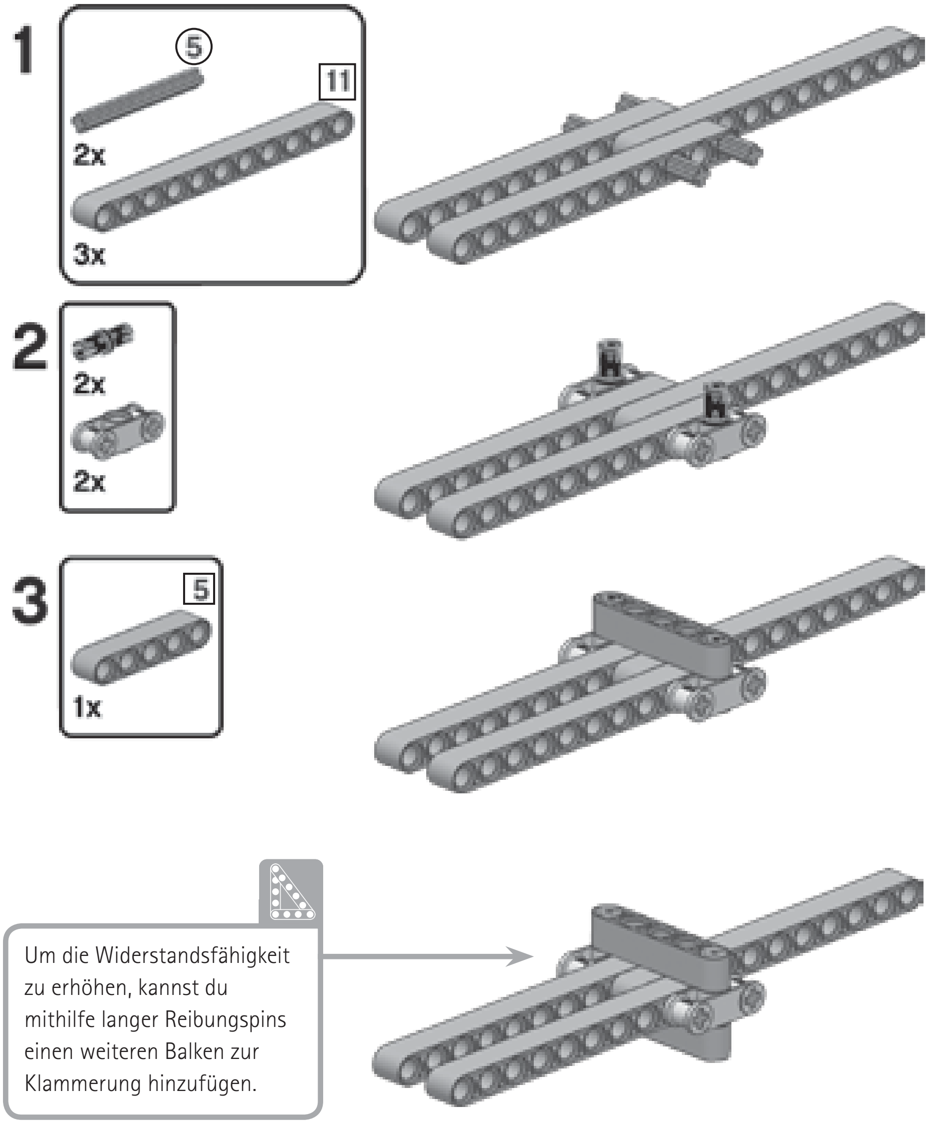
Auch hier wird die Konstruktion stabiler, wenn du die Überlappungszone verlängerst.

Abbildung 8-6: Verlängern und Verdicken von Balken mithilfe von Pins mit Reibung

Klammern

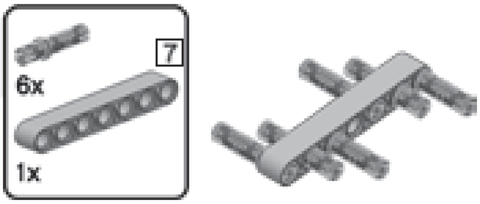
Lego-Konstruktionen halten Druck- und Scherkräften gut stand, fallen bei der Anwendung von Zugkräften aber leicht auseinander. Das ist bewusst so gemacht worden, denn sonst könntest du deine Modelle nicht wieder auseinandernehmen! Unter Spannung können sich Konstruktionen daher schnell in Einzelteile auflösen, da die Balken wegrutschen.

Abhilfe schafft hier ein *Festklammern* der Teile, die sich sonst lösen würden, durch einen oder mehrere Balken. (Diese Technik hast du schon beim Bau des ROV3Rs in Kapitel 2 gesehen.) Dieses Prinzip wirst du besser verstehen, wenn du die beiden folgenden Konstruktionen nachbaust. Ich werde auch bei den verschiedenen Robotern in diesem Buch jeweils auf die Klammerung hinweisen.

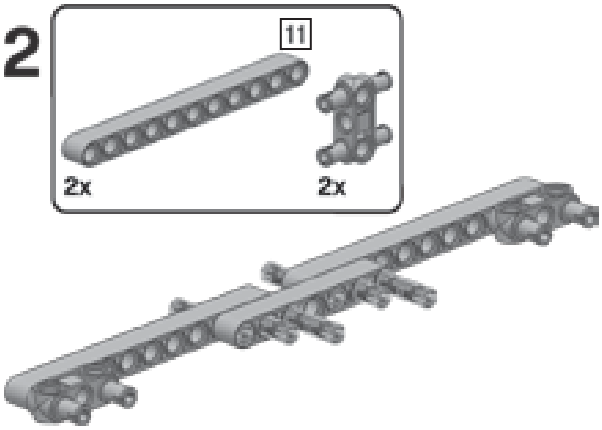


Um die Widerstandsfähigkeit zu erhöhen, kannst du mithilfe langer Reibungspins einen weiteren Balken zur Klammerung hinzufügen.

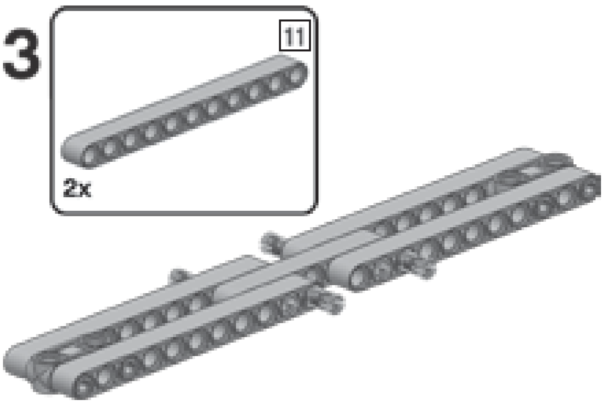
1



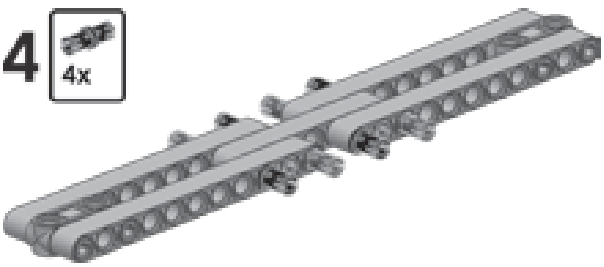
2



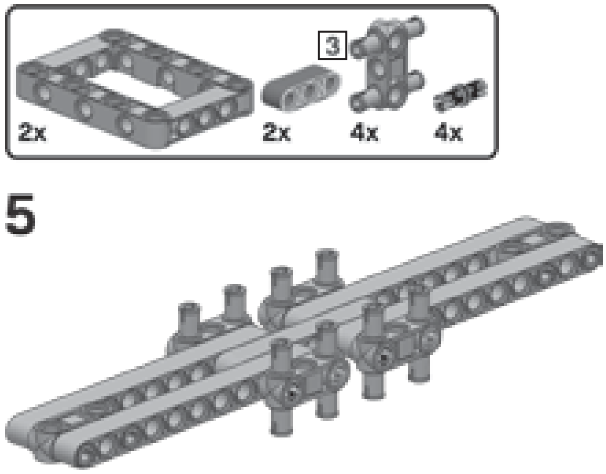
3



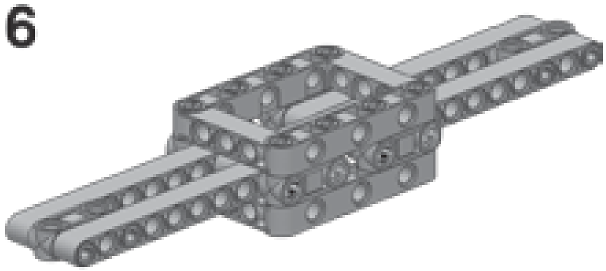
4



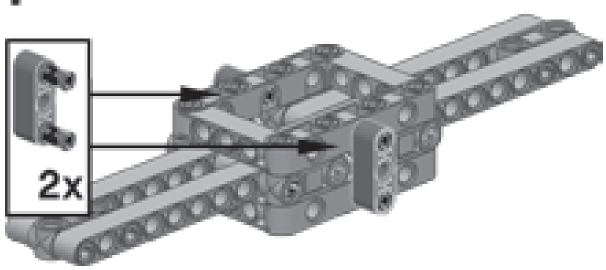
5



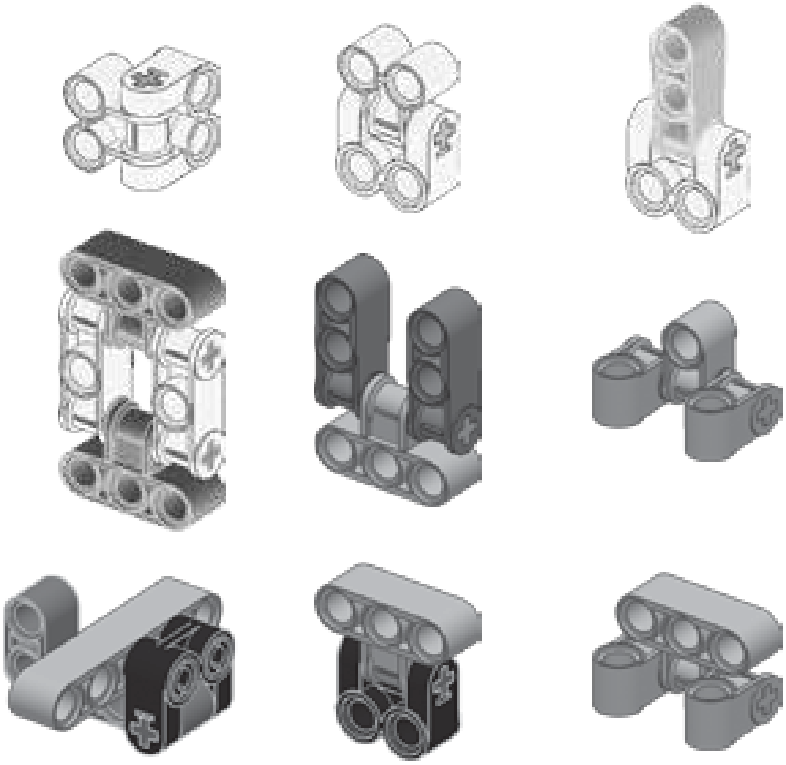
6



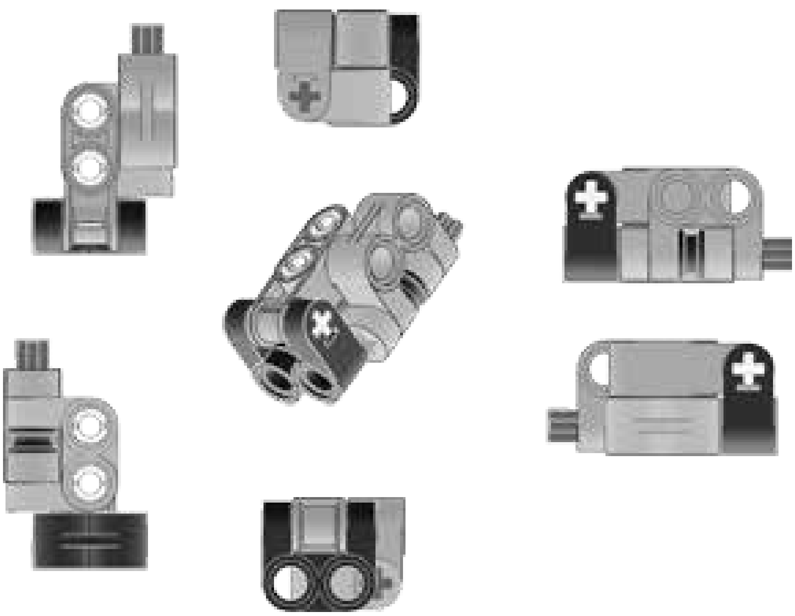
7



Kreuzverbinder



Mit Kreuzverbindern kannst du Lego-Strukturen in allen drei Dimensionen erweitern. Denke immer daran, dass du bei der noppenlosen Bautechnik von Lego Technic in drei Dimensionen denken musst. Du stapelst keine Bausteine aufeinander, sondern musst deine Konstruktion von innen nach außen durchdenken!



Mithilfe von Kreuzverbindern kannst du Bauteile um eine halbe Lochbreite gegeneinander versetzen.

Noch ein Wort zu Zahnrädern

Zahnräder sind dir schon in Kapitel 1 begegnet (in Abbildung 1-13 auf Seite 12). Jetzt sehen wir uns ihre besonderen Eigenschaften an. Es gibt einige grundlegende Dinge, die du über Zahnräder wissen musst:

- Das Maß für Zahnräder ist die Anzahl der Zähne.
- Ob du zwei Zahnräder miteinander kombinieren kannst oder nicht, hängt von ihrem Radius und ihrer Dicke ab.
- Zahnräder weisen ein kreuzförmiges Mittelloch auf, sodass du sie auf Achsen stecken kannst. Damit kannst du eine Drehbewegung von einer Achse auf eine andere übertragen.

Bau die Konstruktion nach, die du oben in Abbildung 8-7 siehst und in der ein 12z-Doppelkegelrad mit einem 36z-Doppelkegelrad verzahnt ist. Wie viele Umdrehungen macht das 36z-Rad, wenn du das 12z-Rad dreimal ganz herumdrehst? Wenn du jetzt »Nur eine!« gesagt hast, dann liegst du richtig. Wenn das kleinere Zahnrad als *Antriebsrad* fungiert, verringern sich sowohl die Anzahl der Umdrehungen als auch die Rotationsgeschwindigkeit des *angetriebenen* oder *Abtriebsrads.*

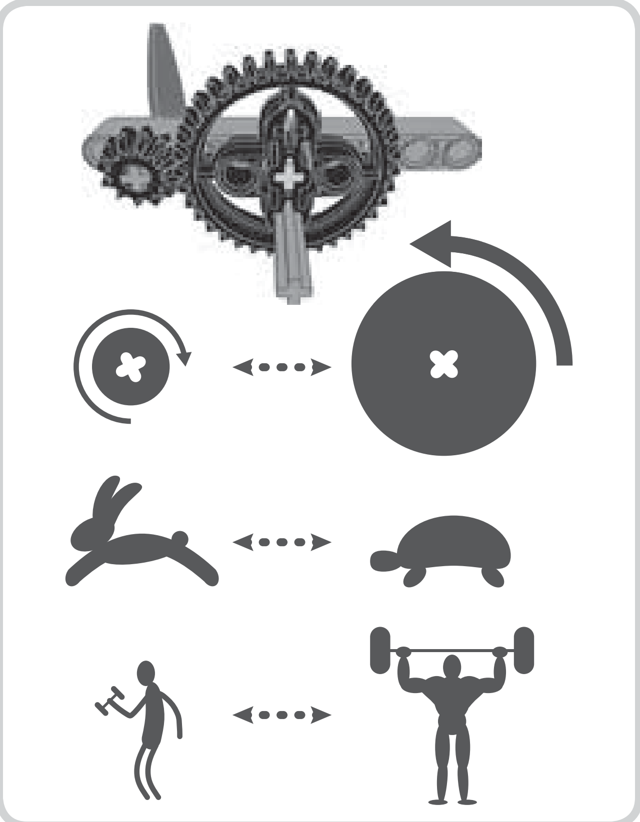


Abbildung 8-7: Zahnräder ändern die Geschwindigkeit und das Drehmoment einer Drehbewegung.

In welchem Zusammenhang steht dieser Effekt mit der Anzahl der Zähne? Diese *Übersetzung* wird durch das Verhältnis der Anzahl der Zähne bestimmt. In unserem Beispiel beträgt dieses Verhältnis 36:12 = 3:1. Das bedeutet, dass sich das 12z-Rad dreimal so schnell dreht wie das 36z-Rad.

Der Vorteil dieser Zahnradkombination besteht darin, dass das 36z-Abtriebsrad ein dreimal so hohes Drehmoment hat wie das 12z-Antriebsrad. Das *Drehmoment* ist die Kraft, die auf einen Körper einwirkt, sodass er sich dreht. Anders ausgedrückt ist das Drehmoment für einen rotierenden Körper das, was die Kraft für die geradlinige Bewegung ist. Zahnräder bestimmen also nicht nur die Geschwindigkeit, mit der sich die angetriebene Achse bewegt, sondern auch das übertragene Drehmoment.

Versuche jetzt das 36z-Zahnrad mithilfe des Hebels einmal ganz um sich selbst zu drehen. Das kleine Zahnrad vollführt dabei drei Umdrehungen, aber nur mit einem Drittel des Drehmoments, das beim großen Zahnrad auftritt.

Zusammenfassend können wir also Folgendes feststellen: Wenn das Antriebsrad kleiner ist als das Abtriebsrad, wird die Geschwindigkeit des Abtriebsrads verringert und sein Drehmoment erhöht. Ist umgekehrt das Antriebsrad das größere der beiden, wird die Geschwindigkeit des Abtriebsrads vergrößert, aber sein Drehmoment verringert. Die Illustrationen unter den Zahnrädern in Abbildung 8-7 zeigen, wie sich Geschwindigkeit und Drehmoment einer Rotation durch Zahnräder ändern.

Eine gute Verzahnung erreichen

Wie sorgst du dafür, dass zwei Zahnräder so gut verzahnt sind, dass sie den Kontakt nicht verlieren und keine Zähne durchrutschen, was zu grässlichen Geräuschen führen würde? Für Lego-Anfänger ist das ein kniffliges Problem, aber die Lösung kannst du in diesem Abschnitt finden! Tabelle 8-1 führt die Radien der Zahnräder in Lego-Einheiten auf. (Um das zu überprüfen, kannst du die Radien mit einem Balken als Vergleichsmaßstab messen. Es ist nicht nötig, diese Werte auswendig zu lernen, sie sind aber sehr hilfreich, um zu erkennen, warum sich manche Zahnräder gut miteinander verzahnen lassen und andere nicht.)

HINWEIS Tabelle 8-1 führt auch einige Zahnräder und Drehscheiben auf, die nicht im Kasten 31313 enthalten sind. Sie sind kursiv angegeben.

Tabelle 8-1: Radien der verschiedenen Zahnräder

Bezeichnung	Radius (in Lego-Einheiten)
8z-Zahnrad	0,5
12z-Doppelkegelrad	0,75
16z-Zahnrad	1
4z-Knebelrad	1
20z-Doppelkegelrad	1,25
24z-Zahnrad	1,5
Kleine Drehscheibe (28z)	1,75
36z-Doppelkegelrad	2,25
40z-Zahnrad	2,5
Große Drehscheibe (56z)	3,5

Es gibt zwei Arten von Zahnradkombinationen: einwandfreie und mangelhafte.

- Eine einwandfreie Zahnradkombination liegt vor, wenn die Summe der Radien ganzzahlig ist. Das ist beispielsweise bei der Kombination 8z mit 24z (0,5 + 1,5 = 2) und 12z mit 20z (0,75 + 1,25 = 2) der Fall.
- Eine mangelhafte Zahnradkombination liegt vor, wenn die Summe der Radien nicht ganzzahlig ist.

Das heißt aber nicht, dass du mangelhafte Kombinationen nicht verwenden darfst! Sie können im Gegenteil sogar sehr nützlich sein. Du musst dir nur bewusst sein, dass Lego solche Kombinationen nicht vorgesehen hat, weshalb die Zähne nur locker ineinandergreifen oder es kompliziert wird, einen Rahmen zu bauen, um die Räder sicher festzuhalten. Aber da es meine Leidenschaft ist, die Regeln von Lego etwas weiter auszulegen (und notfalls zu brechen), solltest du auch mangelhaften Kombinationen eine Chance geben!

Bevor du Regeln brichst, solltest du sie allerdings genau kennen. Sehen wir uns daher alle Zahnräder aus dem EV3-Set sowie einige nicht darin enthaltene an (wie das 8z, das 16z und das 40z), wobei wir die Schnecke und das Knebelrad vorläufig außen vor lassen. Wie du in Tabelle 8-2 ablesen kannst, gibt es 28 mögliche Kombinationen dieser Zahnräder. (Die linke untere Hälfte der Tabelle ist leer, da sie symmetrisch aufgebaut ist. Die Kombination von 12 und 20 ist identisch mit der Kombination von 20 und 12.) Die Einträge in diese Tabelle haben folgende Bedeutung:

- Das Häkchen (✓) bedeutet, dass die Kombination einwandfrei funktioniert und du auch mit Leichtigkeit einen Rahmen bauen kannst, um die Zahnräder festzuhalten.
- Das X (**×**) bedeutet, dass die Kombination mangelhaft ist. Es kann sein, dass sich ein Rahmen für die Zahnräder nur schwer konstruieren lässt oder dass die Kombination zu schwach ist, um Nutzen zu bringen.
- Ein Fragezeichen (**?**) bedeutet, dass ich keine nützliche oder betriebssichere Möglichkeit gefunden habe, um die Kombination zu realisieren. Aber vielleicht entdeckst du ja eine Lösung!

Tabelle 8-2: Mögliche Kombinationen von Lego-Zahnrädern

	8	12	16	20	24	36	40
8	✓	?	×	×	✓	×	✓
12		×	×	✓	×	✓	×
16			✓	×	×	×	×
20				×	×	×	?
24					✓	?	✓
36						×	?
40							✓

Da du jetzt weißt, welche Lego-Zahnräder zusammenpassen, zeige ich dir einige Beispiele für das Bauen mit diesen Elementen. Die folgenden Abschnitte bilden also praktisch dein Lego-Zahnrad-Rezeptbuch!