6

Grundlagen von Zahnrädern und Getrieben

Wozu brauchen wir Getriebe? Spontan würde man sagen: Um die Drehbewegung eines Motors an einen anderen Mechanismus zu übertragen. Das stimmt zwar, ist aber nicht alles. Der entscheidende Zweck von Zahnrädern besteht darin, die *Eigenschaften* der in ein System eingegebenen mechanischen Energie unseren Bedürfnissen anzupassen. Dass dabei Bewegung übertragen wird, ist eine Nebenwirkung.

Zahnräder können durch alle möglichen Arten von Energieeingaben angetrieben werden, seien es Elektromotoren, Handkurbeln, Windturbinen oder Wasserräder. Im Folgenden betrachten wir von E-Motoren angetriebene Zahnräder, da Motoren im Gegensatz zu anderen Mechanismen über konstante, messbare Eigenschaften verfügen.

Jeder Motor weist eine bestimmte mechanische Leistung auf, die sich aus den beiden Faktoren Drehzahl und Drehmoment zusammensetzt. Diese beiden Eigenschaften können wir mithilfe von Zahnrädern umformen. Sowohl Drehzahl als auch Drehmoment wurden ausführlich in Kapitel 1 erläutert.

Wann kommt es auf die Drehzahl an und wann auf das Drehmoment? Jeder Mechanismus und jedes Modell bringt seine eigenen Anforderungen mit. Einige brauchen eine höhere Drehzahl und ein geringeres Drehmoment, als der Motor liefert, während bei anderen das Gegenteil der Fall ist. Mithilfe von Zahnrädern können wir Drehmomente in Drehzahlen umsetzen und umgekehrt. Dazu gibt es zwei sehr einfache, aber auch sehr wichtige Regeln:

- Wird ein großes Zahnrad durch ein kleines angetrieben, erhöht sich das Drehmoment, während die Drehzahl sinkt. Dies wird Untersetzung genannt (siehe Abbildung 6-1).
- Wird ein kleines Zahnrad durch ein großes angetrieben, erhöht sich die Drehzahl, während das Drehmoment sinkt. Dies wird Übersetzung genannt (siehe Abbildung 6-2).

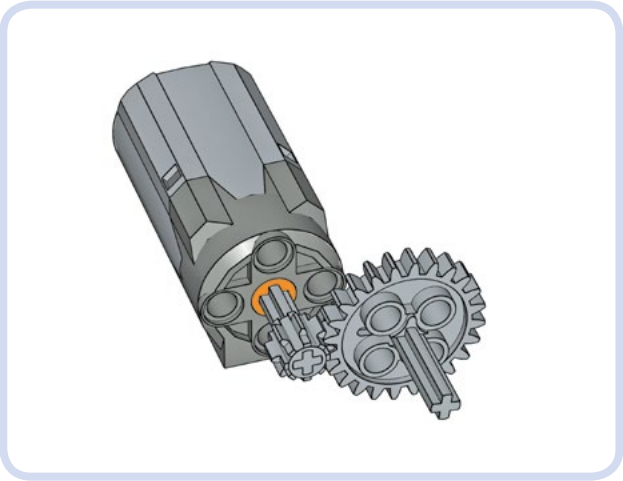


Abbildung 6-1: Untersetzung

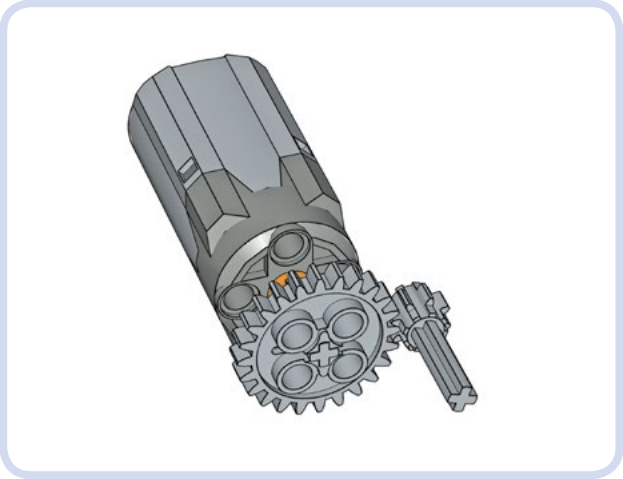


Abbildung 6-2: Übersetzung

Pawel "Sariel" Kmiec, Das "inoffizielle" LEGO®-Technic-Buch, dpunkt.verlag, ISBN 978-3-86490-433-2

Drehzahl und Drehmoment sind *umgekehrt proportional*. Wenn wir die Drehzahl um den Faktor zwei verringern, wird das Drehmoment um den Faktor zwei erhöht. Es ist nicht möglich, eine dieser beiden Eigenschaften zu ändern, ohne die andere zu beeinflussen. Dazu müssten wir die eingehende Leistung ändern, indem wir etwa eine Handkurbel stärker drehen oder einen Motor mit höherer Spannung anschließen.

Um ein leichtes Fahrzeug anzutreiben, das wenig Drehmoment benötigt, um sich vorwärtszubewegen, können wir das überschüssige Drehmoment durch eine Übersetzung in zusätzliche Drehzahl und damit Geschwindigkeit umwandeln. Wie hoch der Anteil des Drehmoments ist, den wir umformen können, hängt hauptsächlich vom Gewicht des Fahrzeugs ab. Erfahrene Bastler können den Bereich der möglichen Umwandlungen anhand des Fahrzeuggewichts und des Motortyps abschätzen.

Antriebsräder, angetriebene Räder und Laufräder

Abbildung 6-3 zeigt ein einfaches Beispiel für die Kraftübertragung mithilfe von Zahnrädern. Der graue Motor ist hier über zwei Zahnräder mit dem Rad verbunden. Das grüne Rad liegt am nächsten an der Leistungsquelle (dem Motor) und wird als *Antriebsrad* bezeichnet. Das rote Zahnrad empfängt von ihm seinen Antrieb und heißt daher *angetriebenes Rad*. (Bei allen Abbildungen in diesem Kapitel wird dasselbe Farbschema verwendet: grün für Antriebsräder und rot für angetriebene.)

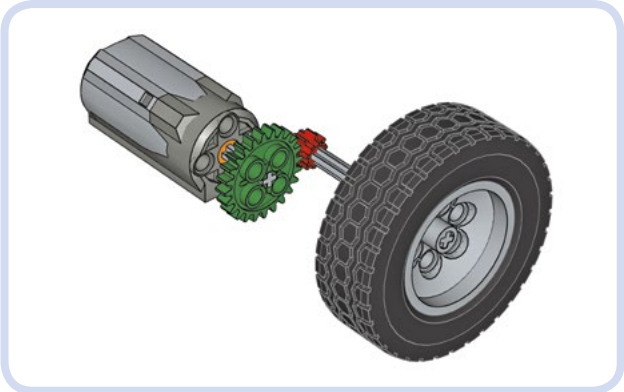


Abbildung 6-3: Antriebsrad (grün) und angetriebenes Rad (rot)

Bei zwei ineinandergreifenden Zahnrädern auf verschiedenen Achsen ist eines immer das Antriebsrad und das andere das angetriebene. Das Antriebsrad ist dasjenige, das den Antrieb überträgt, während das angetriebene Rad ihn empfängt.

Wenn sich die Zahnräder drehen, rotieren auch die Achsen, auf denen sie befestigt sind. Es gibt eine Antriebsachse (den *Eingang*) und eine angetriebene Achse (*Ausgang*), die der Drehung ihrer Zahnräder folgen. Viele Mechanismen haben nur eine Eingangs-, aber viele Ausgangsachsen. Ein gutes Beispiel dafür ist das weit verbreitete Differenzialgetriebe (siehe Abbildung 6-4).

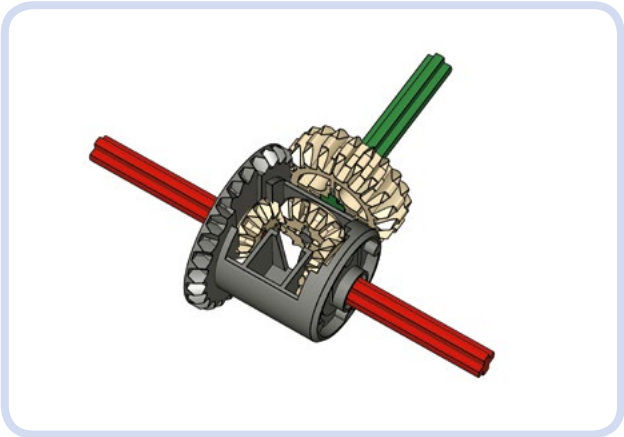


Abbildung 6-4: Das Differenzial hat eine Eingangsachse (grün), aber zwei Ausgangsachsen (rot).

Neben Antriebsrädern und angetriebenen Rädern gibt es auch *Laufräder*. Wenn mehrere Zahnräder in Reihe hintereinander geschaltet sind, ist das erste das Antriebsrad, das letzte das angetriebene Rad und alle anderen dazwischen sind die Laufräder (siehe Abbildung 6-5), da sie einfach nur mitlaufen, ohne die Umwandlung von Drehmoment und Drehzahl zu beeinflussen.

Abbildung 6-5: Drei ineinandergreifende Zahnräder. Die Achse des grau dargestellten Laufrads dient nur zu dessen Befestigung.

Laufräder sind gewöhnlich mit zwei oder mehr anderen Rädern gleichzeitig verzahnt, Antriebs- und angetriebene Räder dagegen nur mit einem (siehe Abbildung 6-6). Ausnahmen von dieser Regel siehst du in Abbildung 6-7.

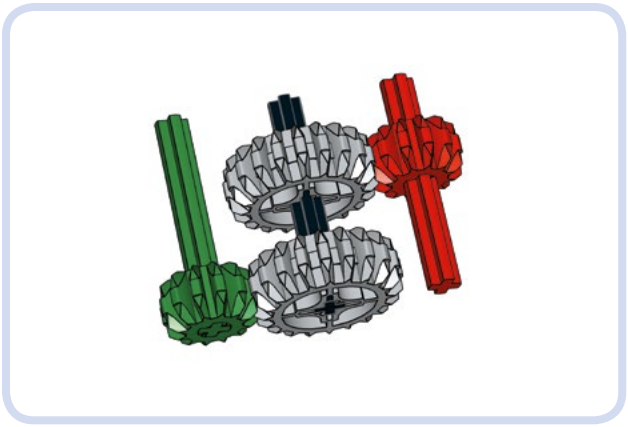


Abbildung 6-6: Die mittleren Zahnräder in diesem Bild sind Laufräder. Beide sind nur mit einem anderen Rad verzahnt, befinden sich aber auf derselben Achse und weisen dieselbe Größe auf, weshalb sie genauso funktionieren wie ein einzelnes Zahnrad.

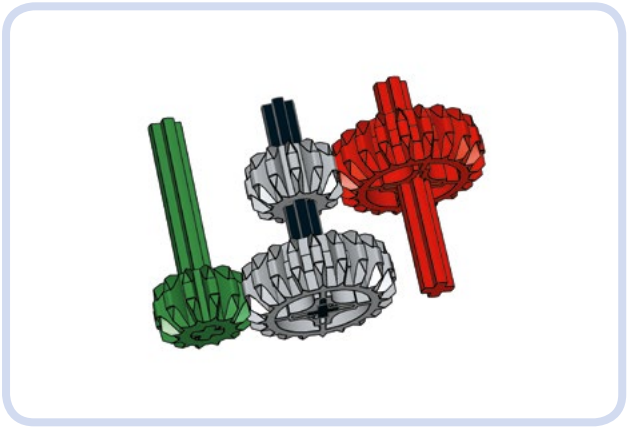


Abbildung 6-7: Die mittleren Zahnräder in diesem Bild sind keine Laufräder. Sie befinden sich auf derselben Achse, weisen aber unterschiedliche Größen auf, was bedeutet, dass sie Einfluss auf die Umwandlung von Drehmoment und Drehzahl haben.

Beachte, dass du Laufräder nur dann verwenden solltest, wenn es absolut notwendig ist, da sie die Reibung erhöhen und korrekt gelagert werden müssen. Abbildung 6-8 zeigt einen Mechanismus mit einem Übermaß an Laufrädern.

Abbildung 6-8: Alle mittleren Zahnräder in diesem Bild sind Laufräder. Sie haben keinen Einfluss auf die Umwandlung von Drehmoment und Drehzahl zwischen dem Antriebsrad und dem angetriebenen Rad.

Übersetzungs-verhältnis

Das *Übersetzungsverhältnis* ist das Verhältnis der Anzahl von Zähnen in zwei gekoppelten Zahnrädern. *Gekoppelte Zahnräder* können verzahnt oder auf andere Weise verbunden sein, beispielsweise durch eine Kette oder über Riemenscheiben mit einem Antriebsriemen. Ob zwei Kettenräder direkt ineinandergreifen oder über eine Kette verbunden sind, ändert nichts an ihrem Übersetzungsverhältnis.

Das Übersetzungsverhältnis ist als der Quotient aus der Anzahl der Zähne des angetriebenen Zahnrads und der Anzahl der Zähne des Antriebszahnrads definiert.

Wenn wir beispielsweise ein Zahnrad mit 24 Zähnen durch eines mit 8 Zähnen antreiben, erhalten wir ein Übersetzungsverhältnis von 24:8. Allerdings werden Übersetzungsverhältnisse immer gekürzt, bis eine der beiden Zahlen 1 ist. Dazu müssen wir einen gemeinsamen Teiler finden (gewöhnlich ist das die kleinere Zahl). Wenn wir bei dem Verhältnis 24:8 Zähler und Nenner durch 8 teilen, ergibt sich 3:1, was eine viel bequemere und offensichtlichere Angabe ist. Daran können wir unmittelbar ablesen, dass drei Umdrehungen des Antriebsrads zu einer einzigen Umdrehung des angetriebenen Rads führen.

Was können wir mit dem Übersetzungsverhältnis anfangen? Mit dieser Angabe können wir leicht berechnen, wie Drehzahl und Drehmoment durch die beiden Zahnräder umgewandelt werden.

Pawel "Sariel" Kmiec, Das "inoffizielle" LEGO®-Technic-Buch, dpunkt.verlag, ISBN 978-3-86490-433-2

Beim Verhältnis 3:1 wird die Drehzahl um den Faktor 3 verringert. Da eine Reduzierung der Drehzahl aber immer umgekehrt proportional zur Erhöhung des Drehmoments verläuft, wird das Drehmoment also verdreifacht.

Als Nächstes betrachten wir ein Beispiel, bei dem das Antriebsrad mehr Zähne hat als das angetriebene, nämlich 20 gegenüber 12. Daraus ergibt sich ein Übersetzungsverhältnis von 12:20 oder 0,6:1. Das bedeutet, dass 0,6 Umdrehungen des Antriebsrads zu einer kompletten Umdrehung des angetriebenen führen. Die Drehzahl erhöht sich also, das Drehmoment sinkt aber: Das angetriebene Zahnrad hat nur noch das 0,6-fache Drehmoment des Antriebsrads.

Das Übersetzungsverhältnis gibt auch an, ob eine Übersetzung oder Untersetzung vorliegt. Ist die erste Zahl in diesem Verhältnis größer als die zweite (wie in 3:1), haben wir es mit einer *Untersetzung* zu tun. Ist die erste dagegen kleiner als die zweite (wie in 0,6:1), liegt eine *Übersetzung* vor. Bei einem Verhältnis von 1:1 bleiben Drehzahl und Drehmoment unverändert.

Wie aber berechnen wir das Gesamtübersetzungsverhältnis eines Mechanismus mit vielen Paaren ineinandergreifender Zahnräder? In diesem Fall betrachten wir jedes mögliche Radpaar, berechnen die Verhältnisse aller einzelnen Paare von Antriebs- und angetriebenen Rädern und multiplizieren sie schließlich. Nehmen wir als Beispiel einen Mechanismus aus zwei Zahnradpaaren, die jeweils aus einem Antriebsrad mit 8 und einem angetriebenen Rad mit 24 Zähnen bestehen. Das Übersetzungsverhältnis des ersten und des zweiten Paars beträgt jeweils 3:1. Durch Multiplikation erhalten wir das Gesamtverhältnis 9:1.

Da wir jetzt wissen, wie wir Übersetzungsverhältnisse berechnen, wollen wir uns noch einmal die zuvor gezeigten Beispiele ansehen, in denen es um Laufräder sowie um Zwischenräder ging, die keine Laufräder waren.

Das erste Beispiel (aus Abbildung 6-6) besteht aus zwei Zahnradpaaren. Bei dem ersten hat das Antriebsrad 12 und das angetriebene 20 Zähne, beim zweiten Paar ist es genau umgekehrt. Das Verhältnis des ersten Paars beträgt 20:12, das des zweiten 12:20. Durch Multiplikation erhalten wir das Gesamtverhältnis 1:1. Die Laufräder ändern also gar nichts an dem Übersetzungsverhältnis zwischen dem ersten und dem letzten Zahnrad.

Sehen wir uns jetzt das zweite Beispiel aus Abbildung 6-7 an. Die beiden Paare sind identisch und bestehen jeweils aus einem Antriebsrad mit 12 und einem angetriebenen Rad mit 20 Zähnen. Das Verhältnis beträgt in beiden Fällen 20:12. Durch Multiplikation erhalten wir ein Gesamtverhältnis von 2,779:1. Das ist nicht identisch mit 1,667:1, dem Verhältnis zwischen dem ersten und dem letzten Zahnrad. Hier handelt es sich bei den zwischengeschalteten Zahnrädern nicht um Laufräder, da sie das Gesamtübersetzungsverhältnis beeinflussen und daher nicht ignoriert werden können.

Zum Schluss stellt sich noch die Frage, wie wir das Verhältnis bei der Verwendung eines Schneckengetriebes berechnen. Das ist sogar noch einfacher: Das Verhältnis ist der Quotient *Anzahl der Zähne des angetriebenen Rads:1*. Das liegt daran, dass eine vollständige Rotation der Schnecke das angetriebene Rad um einen Zahn weiterdreht. Um ein Zahnrad mit 24 Zähnen ganz zu drehen, sind daher 24 Umdrehungen der Schnecke erforderlich. Es liegt also ein Verhältnis von 24:1 vor.

Schnellreferenz für Übersetzungsverhältnisse

Tabelle 6-1 zeigt die resultierenden Übersetzungsverhältnisse bei der Kombination verschiedener Zahnräder. Wähle in der obersten Zeile die Spalte für das Antriebsrad und in der linken Spalte die Zeile für das angetriebene Rad aus. Das Feld, in dem sie sich kreuzen, gibt das Übersetzungsverhältnis im Format *Antriebsrad:angetriebenes Rad* an.

Grün dargestellte Verhältnisse stehen für eine Übersetzung (höhere Drehzahl, geringeres Drehmoment). Beispielsweise bedeutet ein Verhältnis von 1:2, dass eine Umdrehung des Antriebsrads zwei Umdrehungen des angetriebenen Rads hervorruft. Dadurch wird die Drehzahl verdoppelt, das Drehmoment aber halbiert. Bei rot gedruckten Verhältnissen dagegen liegt eine Untersetzung vor (geringere Drehzahl, höheres Drehmoment). Bei einem Verhältnis von 2:1 sind zwei Umdrehungen des Antriebsrads für eine Umdrehung des angetriebenen Rads erforderlich. Hier wird die Drehzahl halbiert, das Drehmoment aber verdoppelt.

Einen Onlinerechner für Übersetzungsverhältnisse und andere nützliche Tools findest du auf *http://gears.sariel.pl*.

HINWEIS In der Tabelle werden nur die am häufigsten verwendeten Zahnräder gezeigt. Es werden auch keine verschiedenen Varianten mit derselben Anzahl von Zähnen aufgeführt. Beispielsweise gibt es drei Arten von 16er-Zahnrädern, aber da sie alle dasselbe Übersetzungsverhältnis hervorrufen, wird in der Tabelle nur die Standardversion gezeigt.

Tabelle 6-1: Übersetzungsverhältnisse

Angetriebenes Rad \ Antriebsrad										
	1:1	1:1,5	1:2	1:2,5	1:3	1:3,5	1:4,5	1:5	1:7	8:1
	1,5:1	1:1	1:1,33	1:1,67	1:2	1:2,33	1:3	1:3,33	1:4,76	12:1
	2:1	1,33:1	1:1	1:1,25	1:1,5	1:1,75	1:2,25	1:2,5	1:3,5	16:1
	2,5:1	1,67:1	1,25:1	1:1	1:1,2	1:1,4	1:1,8	1:2	1:2,8	20:1
	3:1	2:1	1,5:1	1,2:1	1:1	1:1,17	1:1,5	1:1,67	1:2,33	24:1
	3,5:1	2,33:1	1,75:1	1,4:1	1,17:1	1:1	1:1,29	1:1,43	1:2	28:1
	4,5:1	3:1	2,25:1	1,8:1	1,5:1	1,29:1	1:1	1:1,11	1:1,56	36:1
	5:1	3,33:1	2,5:1	2:1	1,67:1	1,43:1	1,11:1	1:1	1:1,4	40:1
	7:1	4,67:1	3,5:1	2,8:1	2,33:1	2:1	1,56:1	1,4:1	1:1	56:1

Wirkungsgrad von Zahnrädern

Jedes Zahnrad hat ein Gewicht und ruft Reibung hervor, die wir überwinden müssen, um das Rad drehen zu können. Bei jedem Zahnrad in einem Mechanismus geht ein Teil der Motorkraft verloren. Der *Wirkungsgrad* eines Zahnrads gibt an, wie viel Energie übertragen wird und wie viel verloren geht. Leider ist es sehr schwer, den Wirkungsgrad einzelner Zahnräder zu bestimmen, vor allem da Zahnräder mit der Zeit verschleißen. Da wir jedoch wissen, auf welche Weise Energie in mechanischen Systemen verloren geht, können wir folgende zwei Faustregeln anwenden, um einen maximalen Wirkungsgrad zu erzielen:

- Je weniger Zahnräder, umso besser.
- Je kleiner die Zahnräder, umso besser.

In der Praxis führt ein niedriger Wirkungsgrad zu einem Verlust an Drehmoment und Drehzahl, denn bei einem geringeren Wirkungsgrad muss der Motor innere Widerstände überwinden (z. B. durch Reibung). Das kannst du bei motorisierten Fahrzeugen erkennen,

Pawel "Sariel" Kmiec, Das "inoffizielle" LEGO®-Technic-Buch, dpunkt.verlag, ISBN 978-3-86490-433-2

deren Räder sich meistens schneller drehen, wenn du sie vom Boden löst. Das bedeutet, dass funktionierende Mechanismen in der Praxis niemals so effektiv sein können, wie das Übersetzungsverhältnis angibt. Wie stark der Wirkungsgrad eines Mechanismus sinkt, hängt vom Wirkungsgrad der Zahnräder ab.

Wie wichtig der Wirkungsgrad ist, kannst du bei jedem Mechanismus erkennen, der über ein Schneckengetriebe verfügt. Die extrem hohe Untersetzung eines Schneckengetriebes kommt auf Kosten des Wirkungsgrads zustande. Nach einigen Quellen geht durch Schneckengetriebe ungefähr ein Drittel der Motorleistung aufgrund von Reibung und der Neigung des Getriebes verloren, entlang der Achse zu verrutschen. Die Reibung ist so hoch, dass Schneckengetriebe heiß laufen, wenn sie längere Zeit einem hohen Drehmoment ausgesetzt werden. LEGO-Schnecken können aufgrund der Reibung auch nicht als angetriebene Räder verwendet werden. Bei manchen Anwendungen sind Schneckengetriebe unverzichtbar, aber im Allgemeinen sollten sie nur spärlich eingesetzt werden.

Zahnspiel

Bei LEGO-Zahnrädern können wir das *Spiel* einfach als den freien Raum zwischen den Zähnen zweier ineinandergreifender Räder definieren. Im Idealfall sollte es gar keinen Abstand geben, aber in der Praxis weisen LEGO-Zahnräder immer ein gewisses Zahnspiel auf. Es gelten folgende allgemeine Regeln:

* Die Zahnräder älteren Typs weisen ein sehr viel höheres Zahnspiel auf als die neuen Kegelräder.
* Je kleiner das Zahnrad, umso größer das Zahnspiel.
* Das Zahnspiel aller direkt ineinandergreifenden Räder summiert sich.

Was ist so schlecht an Zahnspiel? Betrachte als Beispiel einen Lenkmechanismus. Ein erhebliches Spiel zwischen ihm und dem Motor verringert nicht nur die Genauigkeit der Steuerung, sondern gibt den Rädern auch eine gewisse Freiheit, sodass sie beim Auftreffen auf ein Hindernis abweichen können. Das wiederum kann dazu führen, dass das Fahrzeug beim Überfahren von Bodenwellen zur Seite ausbrechen kann oder dass die Lenkung verzögert reagiert.

Immer wenn es auf Genauigkeit ankommt, führt Spiel zu Problemen. Viele Arten von Kränen, Ziehbrücken und Drehscheiben kranken am Spiel. Die beste Möglichkeit, um Spiel zu vermeiden, besteht darin, eine pneumatische statt einer mechanischen Kraftübertragung zu verwenden (siehe Kapitel 10). Es ist auch möglich, auf Linearaktoren zurückzugreifen, die zurzeit von allen mechanischen LEGO-Teilen das geringste Spiel aufweisen (siehe Kapitel 14).

Wie wirkt sich das Spiel bei einem Schneckengetriebe aus? Auch in diesem Punkt erweist sich dieses Bauteil als einzigartig, da es so gut wie kein Spiel hat. Allerdings kann es ein bisschen auf seiner Achse verrutschen, da es etwas schmaler ist als zwei ganze Noppenlängen. Das heißt jedoch nicht, dass ein Mechanismus mit Schneckengetriebe *gar kein* Spiel hat, denn leider gibt es immer noch das Spiel des angetriebenen Zahnrads. Ein Mechanismus aus einer Schnecke und einem angetriebenen Zahnrad mit 16 Zähnen hat daher immer mehr Spiel als bei einem angetriebenen Zahnrad mit 24 Zähnen. Auch hier gilt wieder die Empfehlung, zusammen mit der Schnecke ein Kegelrad einzusetzen, da es nur über ein überschaubares Zahnspiel verfügt.

Die Drehrichtung bestimmen

Wenn Zahnräder direkt ineinandergreifen, beeinflusst das Antriebsrad die Drehrichtung des angetriebenen Rads. Ob sich die Laufräder in dieselbe oder die entgegengesetzte Richtung drehen wie das Antriebsrad, hängt davon ab, wie viele Zahnräder dazwischen liegen. Stehen die Zahnräder in einer Ebene hintereinander, gilt eine einfache Regel: Bei einer geraden Anzahl von Zahnrädern (2, 4, 6 usw.) dreht sich das angetriebene Rad entgegen dem Antriebsrad, bei einer ungeraden Anzahl (3, 5, 7 usw.) in dieselbe Richtung (siehe Abbildung 6-9). Um die Drehrichtung des angetriebenen Rads zu ändern, kannst du also Laufräder einfügen oder entfernen.

Die schnellste Möglichkeit, um die ausgehende Rotation von senkrecht miteinander verzahnten Rädern zu bestimmen, bietet die direkte Beobachtung. Im Antriebsstrang eines 4×4-Fahrzeugs mit einer Antriebswelle in Längsrichtung müssen das vordere und hintere Differenzial entgegengesetzt eingebaut sein, damit sich die Vorder- und Hinterräder in dieselbe Richtung drehen. Das kannst du in Abbildung 6-10 ablesen.

Bestandsaufnahme der verfügbaren Zahnräder

Im Verlauf der Technic-Produktreihe hat LEGO verschiedene Arten von Zahnrädern auf den Markt gebracht, die in verschiedene Gruppen fallen. Wir werden diese Elemente im Folgenden gruppenweise besprechen. Als Erstes schauen wir uns dabei die gebräuchlichsten Zahnräder an.

In Abbildung 6-11 siehst du alle vorhandenen Typen von Zahnrädern. Von einigen gibt es Varianten, die hier jedoch nicht dargestellt sind. Beispielsweise gibt es drei Varianten des Zahnrads mit acht Zähnen, die sich in ihren Hauptmerkmale aber nicht unterscheiden. Die drei Versionen des Zahnrads mit 16 Zähnen sehen sich zwar sehr ähnlich, weisen aber unterschiedliche Eigenschaften auf, weshalb

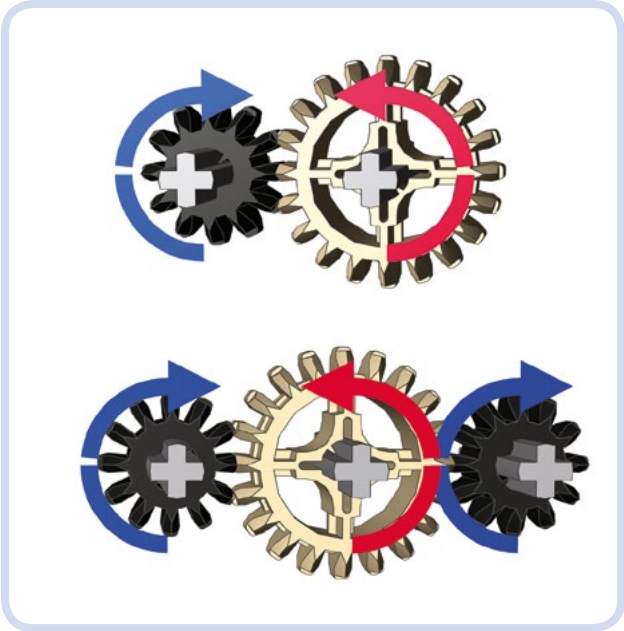


Abbildung 6-9: Gerade Anzahl von ineinandergreifenden Zahnrädern (links) und ungerade Anzahl (rechts)

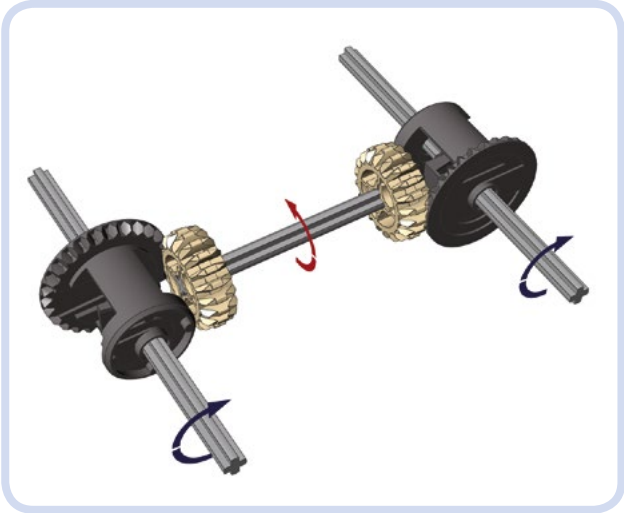


Abbildung 6-10: Die richtige Ausrichtung von Differenzialgetrieben und Kegelrädern in einem 4×4-Antriebsstrang

sie in der Abbildung aufgeführt sind. Der auffälligste Unterschied zwischen den Zahnradtypen besteht in der Form der Zähne. Geradzahnige Räder oder Stirnräder haben rechteckige Zähne, die nur eben mit anderen Rädern verzahnt werden können (siehe Abb. 6-12). Dies sind auch die einzigen Zahnräder, auf die du LEGO-Ketten aufziehen kannst.

Daneben gibt es auch Kegelräder mit abgerundeten und abgeschrägten Zähnen. Wie Abb. 6-13 zeigt, gibt es davon zwei Untertypen, nämlich einfache Kegelräder und Doppelkegelräder; bei Letzteren sidn die Zähne zu beiden Seiten abgeschrägt. Einfache Kegelräder können nur im rechten Winkel und nur mit der abgeschrägten Seite ineinandergreifen, Doppelkegelräder dagegen mit beiden abgeschrägten Seiten und sowohl im rechten Winkel als auch eben. Im Grunde genommen ist ein einfaches Kegelrad eine Hälfte eines Doppelkegelrads. Natürlich können auch Einzel- und Doppelkegelräder miteinander verzahnt werden.

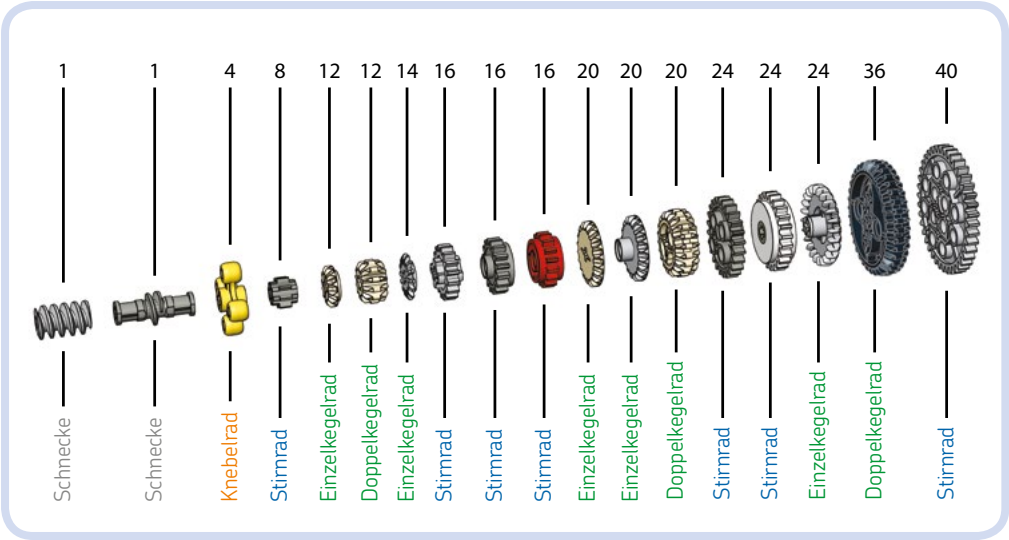


Abbildung 6-11: Arten von LEGO-Zahnrädern mit Anzahl der Zähne

Pawel "Sariel" Kmiec, Das "inoffizielle" LEGO®-Technic-Buch, dpunkt.verlag, ISBN 978-3-86490-433-2

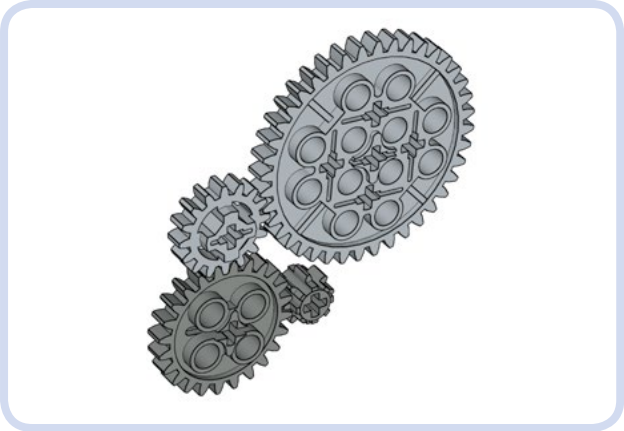
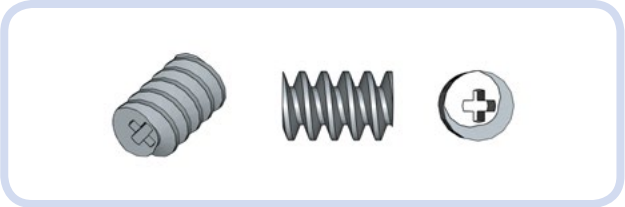


Abbildung 6-12: Stirnräder zeichnen sich durch ihre rechtec kigen Zähne aus, die nur in ebener Anordnung ineinandergreifen können.

Abbildung 6-13: LEGO-Kegelräder und ihre Verzahnungsmöglichkeiten. Einzelkegelräder sind beige dargestellt, Doppelkegelräder hellgrau. Einzelkegelräder sehen nicht nur so aus wie halbierte Doppelkegelräder, sondern funktionieren auch so.

Schließlich gibt es noch Schnecken und Knebelräder für besondere Zwecke, die nur mit ausgewählten Rädern verzahnt werden können. In den folgenden Abschnitten bespreche ich die einzelnen Typen ausführlich.

Schnecke



Diese Sonderform verfügt über eine Reihe besonderer Eigenschaften. Erstens ist es nicht möglich, eine Schnecke mit einem anderen Zahnrad anzutreiben. Sie kann also ausschließlich als *Antriebsrad* eingesetzt werden, niemals als angetriebenes. Sehr praktisch ist die Schnecke für Mechanismen, bei denen etwas angehoben und in der erhöhten Position festgehalten werden muss. In diesem Fall fungiert die Schnecke als eine Sperre und verhindert, dass die Last wieder nach unten sinkt, denn auch wenn die Last an den Zahnrädern des Mechanismus zerrt, können diese Zahnräder die Schnecke doch nicht antreiben Das ist nützlich für Kräne, Gabelstapler, Bahnschranken, Ziehbrücken, Winden usw.

Die Schnecke ist auch sehr gut als Untersetzung geeignet. Eine volle Umdrehung der Schnecke dreht das angetriebene Rad nur um einen einzigen Zahn, was die Drehzahl dramatisch verringert und das Drehmoment entsprechend erhöht. Daher werden Schneckengetriebe zur Untersetzung verwendet, wenn sehr hohe Drehmomente oder sehr niedrige Drehzahlen gebraucht werden und es wenig Platz gibt. Außerdem hat die Schnecke die Neigung, beim Drehen gegen das angetriebene Zahnrad zu drücken und dadurch auf seiner eigenen Achse zu verrutschen. Normalerweise wird versucht, dieses Verhalten zu unterbinden, indem man die Schnecke in ein robustes Gehäuse packt. Es gibt jedoch auch einige Mechanismen, die diesen Effekt ausnutzen (Beispiele findest du in den Kapiteln 10 und 12). Trotz ihres ungewöhnlichen Aussehens können Schnecken sämtliche Stirnräder und mit den richtigen Abständen auch Kegelräder anzutreiben (siehe Abbildung 6-14).

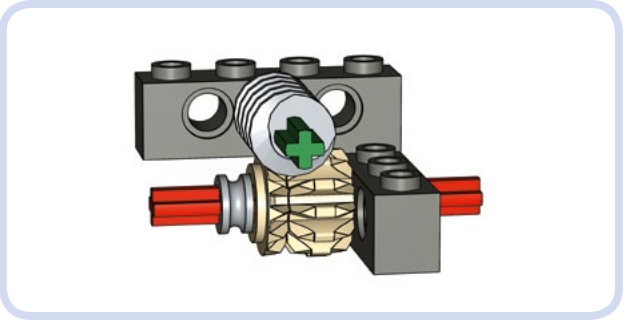


Abbildung 6-14: Eine Schnecke als Antriebsrad für Einzel- und Doppelkegelräder

Es ist sogar möglich, mit der Schnecke Zahnstangen anzutreiben, was einen sehr kompakten Ausfahrmechanismus für Ausleger ergibt (siehe Abbildung 6-15). Das ist vor allem für Kräne, Teleskop-Gabelstapler und andere Anwendungen geeignet, bei denen es auf den Platz ankommt.

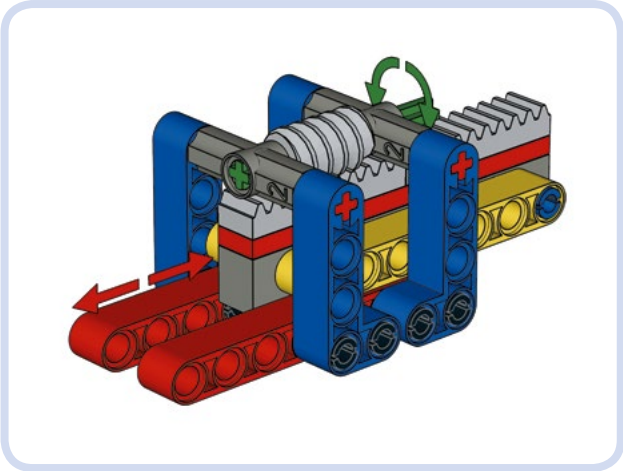
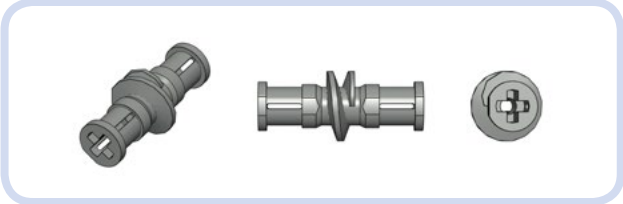


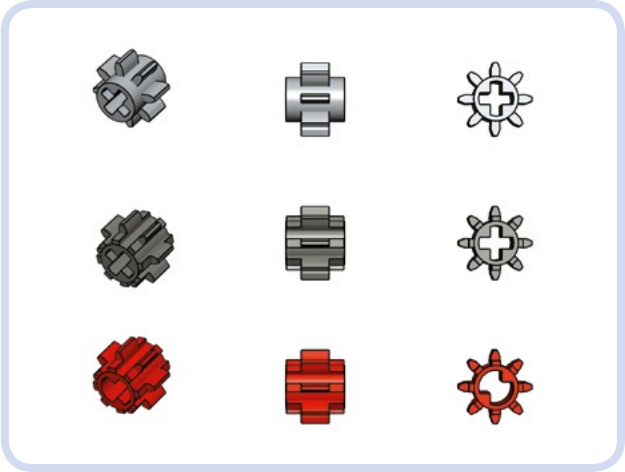
Abbildung 6-15: Eine Schnecke als Antriebsrad für eine Zahnstange

3L-Schnecke



Die 3L-Schnecke wurde in den ersten Ausgaben der drei Bausätze 42023, 42026 und 42027 des Jahres 2014 eingeführt. Sie ist sehr selten, da sie anschließend aufgrund struktureller Probleme von der LEGO-Gruppe zurückgerufen wurde. Allerdings ist dieses Teil mit seinen einzigartigen Eigenschaften nach wie vor gebraucht erhältlich. Die 3L-Schnecke besteht aus zwei Lagerbuchsen von je einer Noppe Länge und Achslöchern sowie aus einem Schneckenabschnitt von einer Noppe Länge in der Mitte. Im Gegensatz zur regulären Schnecke kannst du hier keine Achse durchstecken, da der Mittelabschnitt kein Achsloch hat. Dieses Teil kann mit den gleichen Elementen verzahnt werden wie die normale Schnecke, lässt sich aufgrund des kürzeren Schneckenbereichs aber auch an engeren Stellen einbauen. Außerdem kann es nicht auf der Achse verrutschen.

Zahnrad mit 8 Zähnen



Dies ist das kleinste LEGO-Zahnrad, das es gibt. Es ist sehr zerbrechlich und daher nicht für hohe Drehmomente geeignet. Dank seiner Größe erfreut es sich aber großer Beliebtheit, vor allem zur Untersetzung. Sein größer Nachteil ist sein hohes Zahnspiel.

Es gibt drei Varianten dieses Zahnrads. Von oben nach unten sind dies:

Ursprüngliche Version Die dünnen Zähne konnten durch hohe Drehmomente verbogen werden. Es konnte auch passieren, dass sich das dünne Mittelstück in einem Stiftloch verkantete.

Verstärkte Version Diese Version wurde 2013/2014 eingeführt und wies einen erheblich verstärkten mittleren Ring auf, sodass sie widerstandsfähiger gegen hohe Drehmomente war und auch nicht in Stiftlöchern verloren gehen konnte.

Gleitfähige Version Diese sehr seltene Variante der verstärkten Version kann frei entlang einer Achse gleiten. Entworfen wurde sie eigens für den Auslegerantrieb des Mobilkran-Bausatzes 42009. Darin wurde das Zahnrad festgehalten, während die Achse hindurchgleiten konnte, sodass die Ausleger ein- und ausgefahren werden konnten.

Das verstärkte Zahnrad mit acht Zähnen ist in jeder Hinsicht besser als die ursprüngliche Version (siehe Abb. 6-16), die von ihm ersetzt wurde. Übrigens wurden von der Originalversion wiederum mindestens drei verschiedene Varianten in leicht veränderten Gussformen produziert (siehe Abb. 6-17). Offensichtlich hat LEGO versucht, das Zahnrad zu verbessern, bevor es durch die verstärkte Version ersetzt wurde.

Keines der Zahnräder mit acht Zähnen ist zur Verwendung mit LEGO-Ketten geeignet. Die Ketten gleiten über die ursprüngliche Version einfach hinweg und verzahnen sich auch nicht mit der neuen.

Pawel "Sariel" Kmiec, Das "inoffizielle" LEGO®-Technic-Buch, dpunkt.verlag, ISBN 978-3-86490-433-2

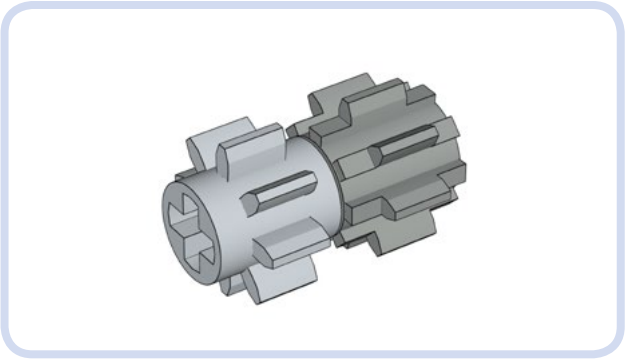
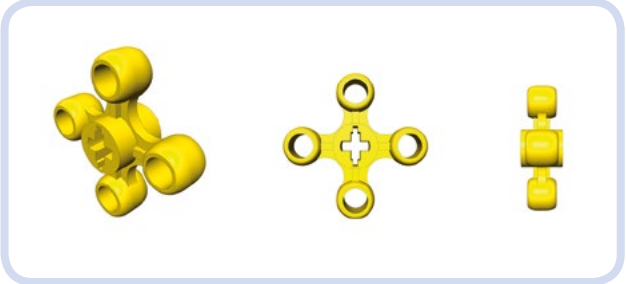


Abbildung 6-16: Das verstärkte Zahnrad mit acht Zähnen (rechts) ist dicker als das ursprüngliche (links) und sieht anders aus. Allerdings kann es überall da verwendet werden, wo auch die ursprüngliche Version eingesetzt wurde, und bildet damit einen idealen Ersatz.

Abbildung 6-17: Die drei Gussvarianten des ursprünglichen Zahnrads mit acht Zähnen

Knebelrad

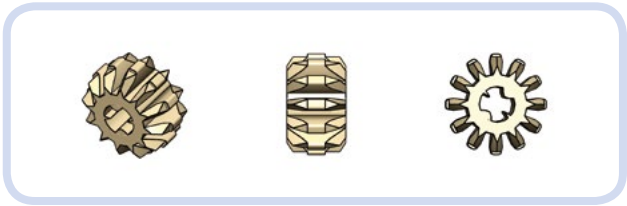


Dies ist ein sehr wichtiges und beliebtes Bauteil, auch wenn es sich technisch gesehen nicht um ein Zahnrad handelt. Knebelräder können nur mit anderen Knebelrädern verzahnt werden, und zwar sowohl eben als auch rechtwinklig. Ihr Vorteil besteht darin, dass sie viel robuster sind als Zahnräder und mit erheblich höheren Drehmomenten fertig werden. Vor allem werden sie für die rechtwinklige Verzahnung eingesetzt, da reguläre Zahnräder in einer solchen Konfiguration bei hohen Drehmomenten eher brechen als Knebelräder. Der Nachteil der Knebelräder besteht in der ungewöhnlichen Form ihrer »Zähne«, die zu einem *ungleichmäßigen Lauf* führen. Das zeigt sich vor allem, wenn ein hohes Drehmoment auf rechtwinklig verzahnte Knebelräder ausgeübt wird – die Drehgeschwindigkeit beginnt dann zu schwanken. Da das gesamte Drehmoment an so wenigen Punkten angreift, verschleißen Knebelräder auch sehr stark. Sie werden an den Verzahnungspunkten abgescheuert, was dazu führt, dass verschlissene Kegelräder unter Last quietschende Geräusche von sich geben.

Einzelkegel mit 12 Zähnen

Dies ist das kleinste Kegelrad. In Differenzialmechanismen ist es unverzichtbar. Außerdem wird es immer gern eingesetzt, wenn Antriebskraft auf engem Raum im rechten Winkel übertragen werden muss. Unter hohen Drehmomenten zerbricht es leicht, weshalb viele Konstrukteure in Offroad-Fahrzeugen gar keine Differenziale mehr einbauen.

Doppelkegelrad mit 12 Zähnen

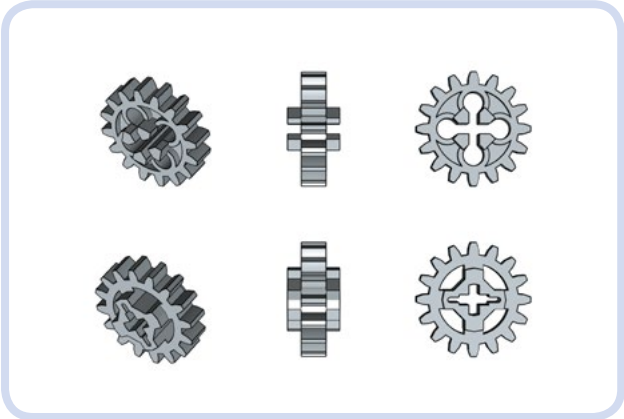


Dieses Zahnrad ist viel stärker als das Gegenstück in Einzelkegelform und wird häufig zusammen mit dem Doppelkegelrad mit 20 Zähnen eingesetzt. Es passt nicht in Differenziale oder in enge Stellen, weshalb es für die senkrechte Verzahnung nicht so häufig verwendet wird.

Zahnrad mit 14 Zähnen

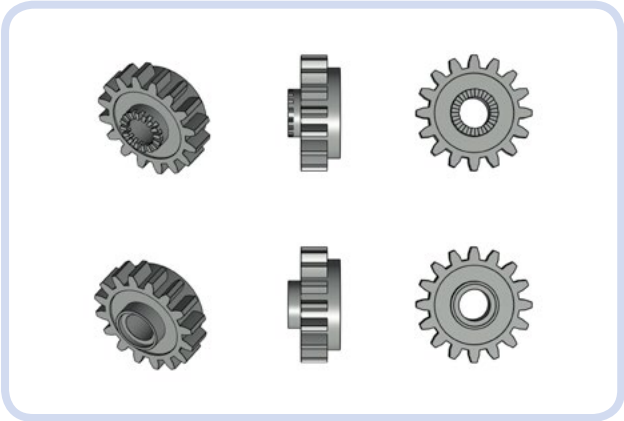
Dies war das erste Zahnrad, das in Differenzialen eingesetzt wurde. Allerdings war es so zerbrechlich, dass es später durch die Version mit 12 Zähnen ersetzt wurde. In offiziellen LEGO-Modellen wird es nicht mehr verwendet, und auch bei Bastlern ist es nicht beliebt.

Zahnrad mit 16 Zähnen



Dies ist ein halbwegs robustes und nützliches Zahnrad. Es ist das kleinste, das für LEGO-Ketten verwendet werden kann. Die ursprüngliche Version (oben) wurde 2011 durch eine verstärkte ersetzt (unten). In der neuen Form ist das Zahnrad weit weniger zerbrechlich, in allen anderne Aspekten aber ist es identisch mit der ursprünglichen Version.

Zahnrad mit 16 Zähnen und Kupplung



Dieses Zahnrad wurde eigens für Getriebe entworfen. Es eignet sich nicht so gut für LEGO-Ketten, da aufgrund der kürzeren Zähne ein Kettenschlupf auftritt. Dafür weist es jedoch die besondere Eigenschaft auf, dass es sich über einen Getriebe-Antriebsring zuschalten und wieder auskuppeln lässt (siehe Abbildung 6-18). Diese Eigenschaft sehen wir uns in Kapitel 19 noch genauer an. Im ausgekuppelten Zustand steckt es lose auf der Achse. Die ursprüngliche Variante (oben) hatte kleine Zähne rund um die mittlere Öffnung (siehe Abb. 6-19), die mit einer Halbbuchse älteren Typs (also mit Zähnen) verzahnt werden konnten, um das Rad auf der Achse zu fixieren (siehe Abbildung 6-20). 2011 wurde diese Variante durch eine glatte Version ohne Zähne ersetzt (unten).

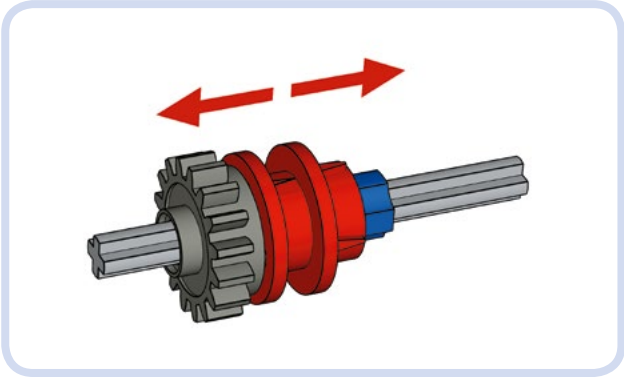


Abbildung 6-18: Das Zahnrad mit 16 Zähnen und Kupplung kann durch einen Getriebe-Antriebsring ein- und ausgekuppelt werden.

Abbildung 6-19: Die ursprüngliche Varianten des Zahnrads mit 16 Zähnen (links) hatte Zähne rund um die Öffnung, die neue Version (rechts) ist glatt.

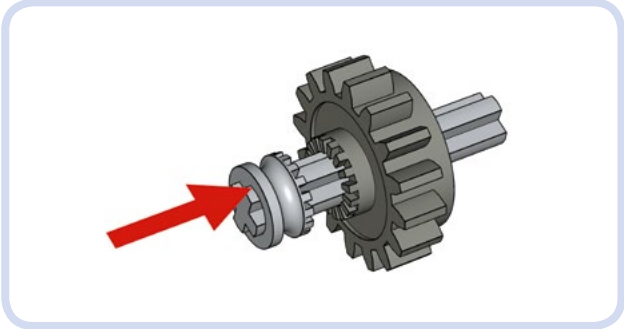
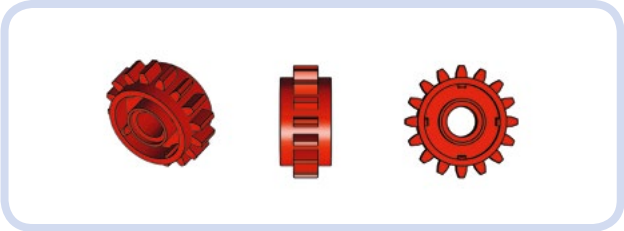


Abbildung 6-20: Die ursprüngliche Version des Zahnrads mit 16 Zähnen und Kupplung konnte durch eine gezahnte Halbbuchse älteren Typs auf der Achse fixiert werden. Bei der glatten Variante besteht diese Möglichkeit nicht.

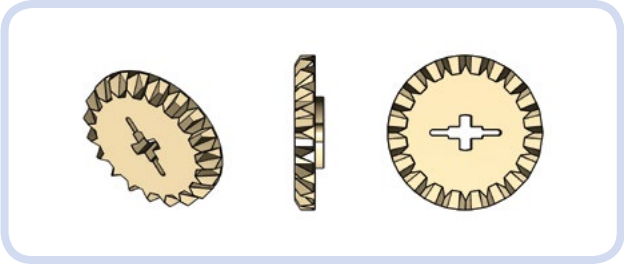
Pawel "Sariel" Kmiec, Das "inoffizielle" LEGO®-Technic-Buch, dpunkt.verlag, ISBN 978-3-86490-433-2

Zahnrad mit 16 Zähnen und beidseitiger Kupplung



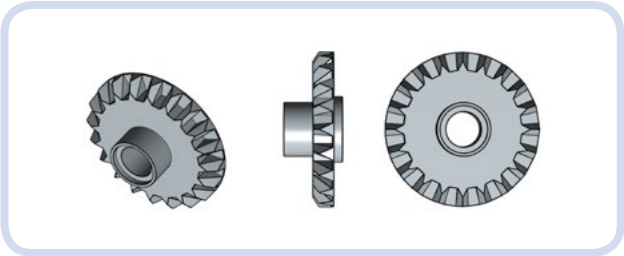
Dieses 2015 eingeführte Zahnrad mit 16 Zähnen hatte auf beiden Seiten eine Kupplung und ist offensichtlich als Ersatz für das reguläre Zahnrad mit 16 Zähnen und Kupplung gedacht. Wahrscheinlich soll es Baufehler vermeiden helfen, da es keine »richtige« oder »falsche« Seite gibt: Es funktioniert unabhängig davon, wie herum es in ein Getriebe eingebaut wird. Es kann jedoch nur mit dem Antriebsrad des 3L-Getriebes verzahnt werden, nicht mit dem des älteren 2L-Getriebes.

Einzelkegelrad mit 20 Zähnen



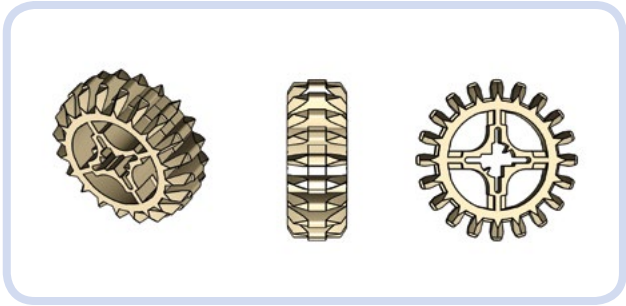
Dies ist eine größere Version des Einzelkegelrads mit 12 Zähnen. Es ist relativ selten und aufgrund seines dünnen Korpus nicht sehr beliebt, da es unter hohen Drehmomenten leicht bricht.

Einzelkegelrad mit 20 Zähnen und Stiftloch



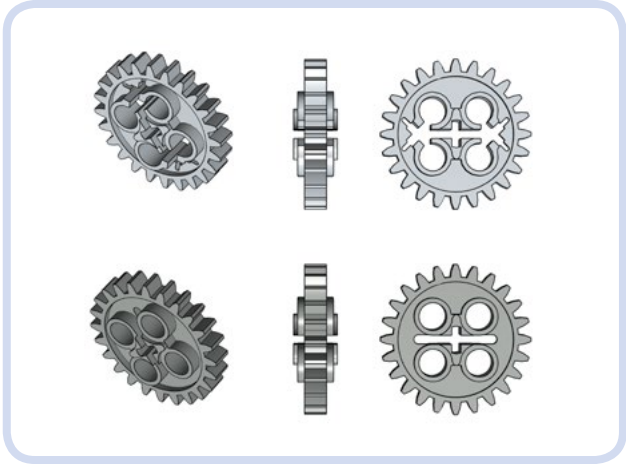
Diese Variante wurde nicht als Ersatz für das reguläre Einzelkegelrad mit 20 Zähnen eingeführt, sondern um neue Möglichkeiten zu bieten. Unter anderem kann sich dieses Rad frei um eine Achse drehen. Dadurch ist es möglich, Antriebskraft über die Achse hinweg zu übertragen, ohne die Achse selbst anzutreiben und deren Reibung aufzunehmen. Das neue Zahnrad hat an der Stirnseite auch einen Kragen von einer halben Noppe Dicke, sodass es sich nich so leicht verbiegt und bricht. Diesses Zahnrad wird häufig als Antrieb für Linearaktoren eingesetzt (siehe Kapitel 14).

Doppelkegelrad mit 20 Zähnen



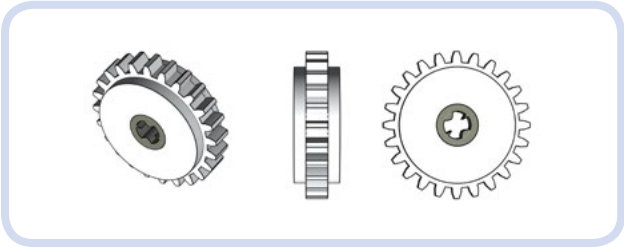
Dies ist ein sehr beliebtes, robustes und zuverlässiges Zahnrad. Gewöhnlich wird es zusammen mit einem Einzelkegelrad mit 12 Zähnen eingesetzt, aber es erweist sich auch in anderen Kombinationen als nützlich.

Zahnrad mit 24 Zähnen



Von diesem beliebten, robusten und zuverlässigen Zahnrad gibt es eine ursprüngliche Variante (oben) und eine verstärkte (unten). Es geht zurück auf Technic-Bausätze der 70er Jahre und gehört bis heute zu den beliebtesten Zahnrädern.

Zahnrad mit 24 Zähnen und Kupplung



Dieses Zahnrad mit 24 Zähnen ist weiß und hat ein dunkelgraues Mittelteil. Seine einzigartige Eigenschaft besteht darin, dass es einfach wirkungslos durchdreht, wenn es die Achse nicht bewegen kann. Meistens wird es für Anwendungen eingesetzt, bei denen der Motor nur zugeschaltet sein darf, bis ein bestimmter Punkt erreicht ist. Das gilt beispielsweise für fast alle Lenkmechanismen, bei denen sich die Räder nur bis zu einem maximalen Einschlagwinkel drehen dürfen, für Bahnschranken, die nur um einen bestimmten Winkel abgesenkt und angehoben werden, und für Winden. Bei solchen Mechanismen dreht das Zahnrad durch, wenn der Grenzwert erreicht ist, sodass der Motor gefahrlos weiterlaufen kann, während der Mechanismus selbst angehalten ist.

Bei welchem Drehmoment das Zahnrad durchzudrehen beginnt, hängt davon ab, wie viel Widerstand die Achse dem Zahnrad bei der Drehung entgegensetzt. Gewöhnlich soll das Rad erst dann durchdrehen, wenn die Achse tatsächlich blockiert, und nicht, wenn sie nur schwergängig ist. Dies kannst du erreichen, indem du zwischen das Zahnrad und die letzte von ihm angetriebene Achse (die rote in Abb. 6-21) eine zusätzliche Untersetzung einbaust. Da hier zwischen Achse und Zahnrad ein Übersetzungsverhältnis von 3:1 herrscht, muss die Achse einen dreimal höheren Widerstand zeigen, um das Zahnrad zum Durchdrehen zu bringen, als bei direkem Anschluss an das Rad.

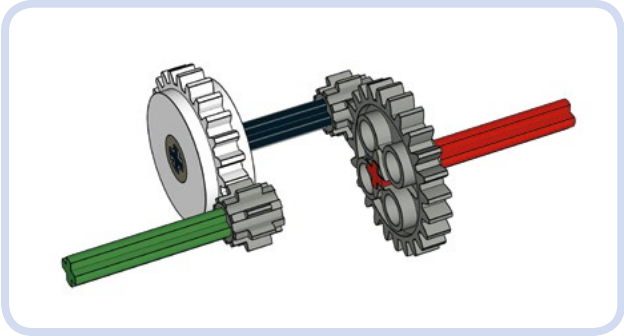
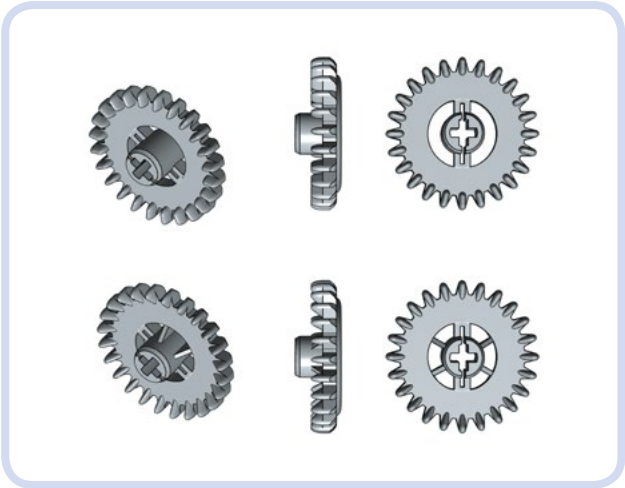


Abbildung 6-21: Das Übersetzungsverhältnis von 3:1 zwischen dem Zahnrad mit Kupplung und dem angetriebenen Mechanismus (rote Achse) macht die Konstruktion effizienter. Die rote Achse muss einen dreimal so hohen Widerstand zeigen, damit das Zahnrad durchdreht.

Nicht alle diese Zahnräder sehen gleich aus oder beginnen gleichzeitig durchzudrehen. Bei den ursprünglichen Versionen stand *2.5*5.0 Ncm* auf der Seite, aber bei neueren gibt es diese Beschriftung nicht mehr.

Kronrad mit 24 Zähnen



Dieses Kronrad bildete einen ersten Versuch in Richtung Kegelräder. Es ähnelt dem regulären Stirnrad mit 24 Zähnen, und auch hier gibt es wieder eine ursprüngliche Version (oben) und eine verstärkte (unten). Es kann mit Stirnrädern in der Ebene und in einem Winkel verzahnt werden, wie Abb. 6-22 zeigt, aber es ist schwach und aufgrund seiner Form und der vorspringenden Nabe schwierig zu verwenden. Moderne Kegelräder sind vielseitiger.

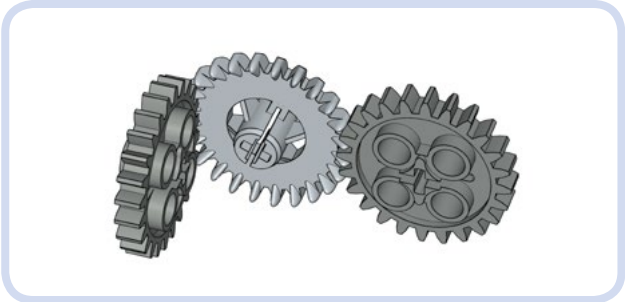
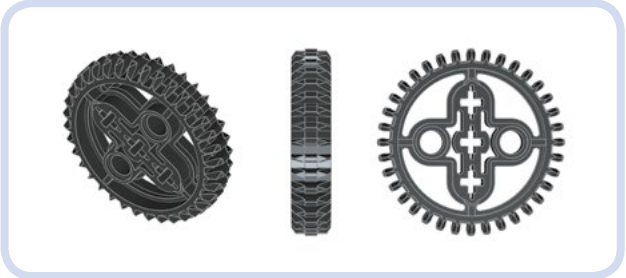


Abbildung 6-22: Das Kronrad mit 24 Zähnen (hellgrau) kann in der Ebene und im Winkel mit regulären Stirnrädern verzahnt werden.

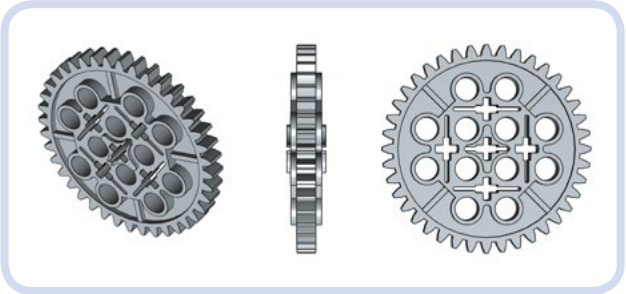
Pawel "Sariel" Kmiec, Das "inoffizielle" LEGO®-Technic-Buch, dpunkt.verlag, ISBN 978-3-86490-433-2

Zahnrad mit 36 Zähnen



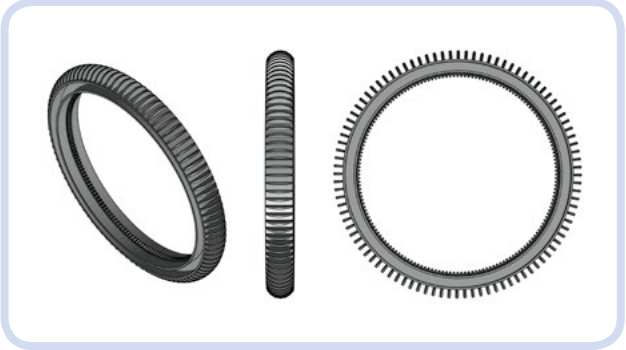
Dies ist das größte Kegelrad und das einzige, von dem es keine Einzelkegelversion gibt. Dieses Zahnrad lässt sich bequem verwenden und ist überraschend robust. Allerdings ist es recht selten. Die übliche Farbe ist Schwarz.

Zahnrad mit 40 Zähnen



Dies ist das größte reguläre Zahnrad. Es ist zwar selten und wird aufgrund seiner enormen Größe auch nur selten verwendet, allerdings erfreut es sich als Kettenrad für ältere Arten von Ketten einer gewissen Beliebtheit.

Hailfire Droid

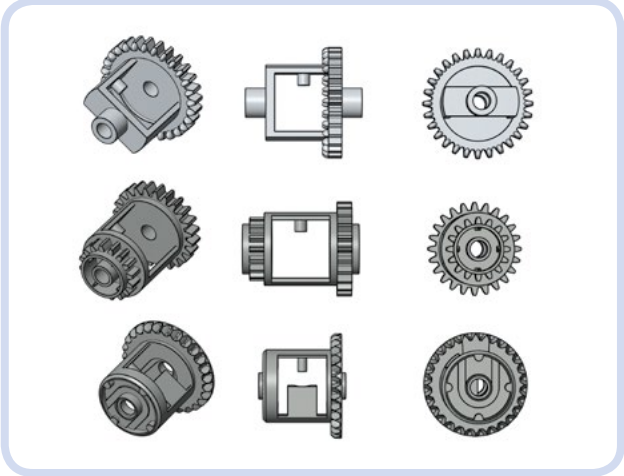


Dank der 168 Zähne auf dem inneren Ring kann dieses sehr große (212 mm bzw. 26,5 Noppen) und sehr seltene Teil (nur enthalten im Bausatz 4481) durchaus als Zahnrad betrachtet werden. Es ist insgesamt 3 Noppen dick, die inneren Zähne sind 1 Noppe breit, und auf beiden Seiten befindet sich eine 1 Noppe tiefe Rille. Da es kein Achsloch aufweist, musst du für den Antrieb einen Mechanismus in den Innenraum einbauen oder darum herum konstruieren.

Hailfire-Droid-Zahnräder sind sehr gut als Drehscheiben in sehr großen Modellen geeignet. Es ist möglich, zwei dieser Zahnräder übereinanderzustapeln und die Rillen auf den einander berührenden Seiten mit 41 LEGO-Kugeln zu füllen (siehe Abbildung 6-23). Dadurch ergibt sich ein Mechanismus, der wie ein Kugellager wirkt und sich unter erheblichen Lasten drehen kann. Außerdem ist das Zahnrad aufgrund seiner immensen Größe sehr stabil.

Abbildung 6-23: Diese Drehscheibe besteht aus zwei Hailfire-Droid-Rädern. Zum Auffüllen sind 41 LEGO-Standardkugeln erforderlich.

Differenzialgetriebe



LEGO hat drei Arten von Differenzialgetrieben hergestellt, die wir uns in der Reihenfolge von oben nach unten in der vorstehenden Abbildung ansehen werden.

Differenzialgetriebe mit 28 Zähnen des älteren Typs

Dies ist das älteste Differenzialgetriebe. Es ist für die Verwendung von Zahnrädern mit 14 Zähnen in seinem Inneren gedacht, funktioniert aber auch mit Einzelkegelrädern mit 12 Zähnen. Es nimmt viel Platz ein und weist 28 Zähne auf, die sowohl eben als auch rechtwinklig verzahnt werden können. Dieses Zahnrad wird ausschließlich hellgrau hergestellt.

16/24-Differenzialgetriebe

Dieses Nachfolgemodell des alten Differenzialgetriebes ist weit vielseitiger und lässt sich auch in Situationen einsetzen, in denen andere Differenzialgetriebe nicht verwendbar sind. Es weist zwei Zahnräder auf, eines mit 16 und eines mit 24 Zähnen, die beide nur eben verzahnt werden können. Das Rad mit 24 Zähnen lässt sich auch mit einer LEGO-Kette antreiben. Außerdem können beide Enden mit einem Getriebe-Antriebsring eingekuppelt werden, wobei das Differenzial gesperrt wird (siehe Abbildung 6-24). Diese Form wird fast ausschließlich dunkelgrau hergestellt.

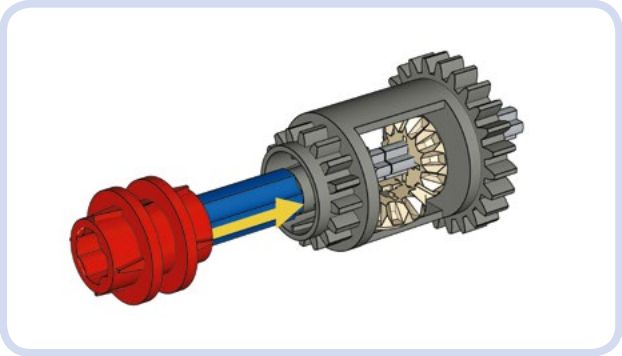


Abbildung 6-24: Ein 16/24-Differenzial, das über einen Getriebe-Antriebsring gesperrt ist. In diesem Zustand wirkt es nicht wie ein Differenzial, sondern wie eine durchgehende Achse. Sperrfähige Differenziale sind vor allem bei Offroad-Fahrzeugen nützlich.

Differenzialgetriebe mit 28 Zähnen des neuen Typs

Diese Variante wurde aufgrund der wachsenden Beliebtheit noppenloser Konstruktionen eingeführt, in die sich ein Differenzial geradzahliger Größe nur schwer einbauen lässt. Sie verfügt über 28 Zähne, die nur rechtwinklig verzahnt werden können, und ist nur drei Noppen breit. Obwohl dieses Differenzial deutlich weniger massig ist, erweist es sich doch als erstaunlich robust, vor allem, wenn es in einen eigens dafür vorgesehenen noppenlosen 5×7-Rahmen eingeschlossen wird (siehe Abbildung 6-25). Das Innenleben wurde so umkonstruiert, dass es nur Einzelkegelräder mit 12 Zähnen aufnehmen kann. Die besondere Innenstruktur hält diese Räder sicherer an Ort und Stelle.

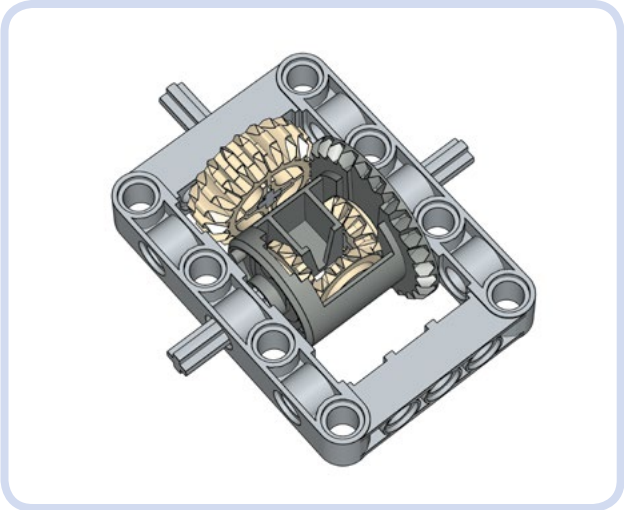


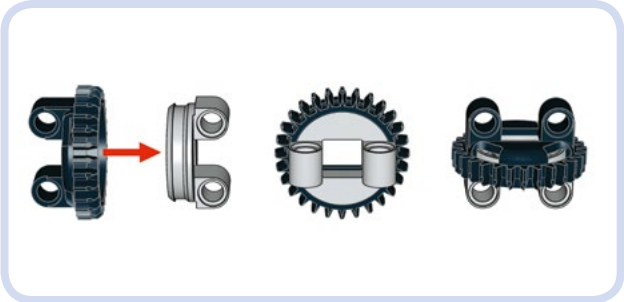
Abbildung 6-25: Das Differenzial mit 28 Zähnen des neuen Typs in der üblichen robusten Konfiguration, nämlich eingeschlossen in einen noppenlosen 5×7-Rahmen und angetrieben von einem Doppelkegelrad mit 20 Zähnen

Drehscheiben

Es gibt vier verschiedene LEGO-Technic-Drehscheiben, eine kleine und drei große. Sie bestehen jeweils aus zwei Hälften, wobei sich die obere auf der unteren dreht.

Oberseite und Unterseite weisen jeweils eine unterschiedliche Farbe auf. In den folgenden Abbildungen sind die am häufigsten auftretenden Farbkombinationen dargestellt.

Kleine Technic-Drehscheibe



Die kleine Drehscheibe ist 3 Noppen hoch und hat einen Durchmesser von 28 mm oder 3,5 Noppen. Die obere Hälfte weist auf der Außenseite 28 Zähne auf. An der Seite, die zur Unterhälfte weist, sind die Zähne abgeschrägt (siehe Abb. 6-26). Das Loch in der Mitte ist quadratisch mit einer Größe von 1×1. Wir können daher Achsen

Pawel "Sariel" Kmiec, Das "inoffizielle" LEGO®-Technic-Buch, dpunkt.verlag, ISBN 978-3-86490-433-2

(auch mit Lagerbuchsen und Achsverbindern), Kardangelenke, die Stangen von Pneumatikzylindern und Linearaktoren, bis zu vier Pneumatikschläuche und sogar einen Balken darin einführen, wobei das viereckige Profil des Balkens jedoch verhindert, dass die Drehscheibe rotiert. Was wir nicht durch die kleine Drehscheibe führen können, sind Drähte – da die Stecker zu groß sind – und LEGO-LEDs. Eine Verzahnung mit der Schnecke ist äußerst schwierig.

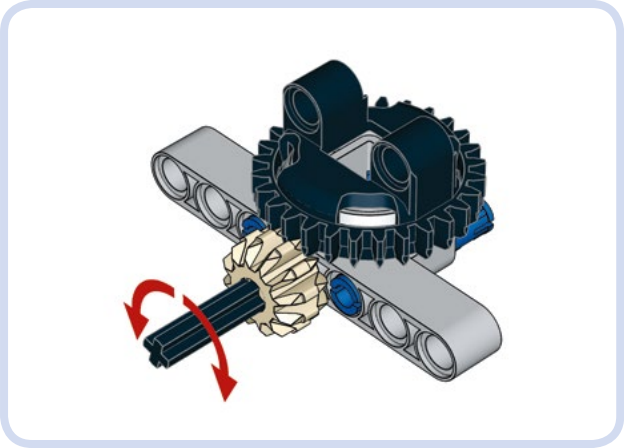
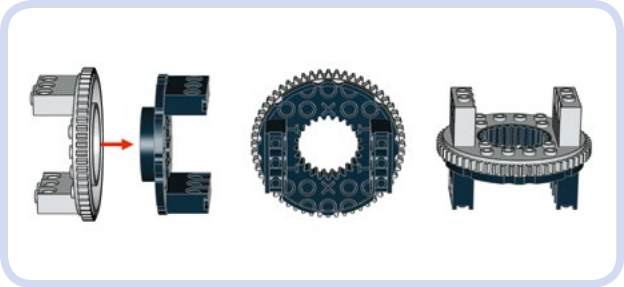


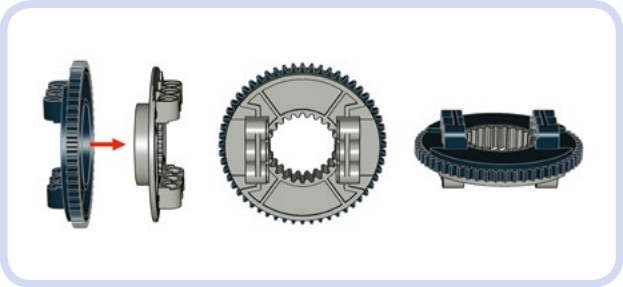
Abbildung 6-26: Ein Einzel- oder Doppelkegelrad mit 12 Zähnen kann von unten in eine kleine Drehscheibe eingreifen. Dies stellt eine einfache Möglichkeit dar, um die Drehscheibe in Rotation zu versetzen.

Große Technic-Drehscheibe mit 56 Zähnen und Noppen



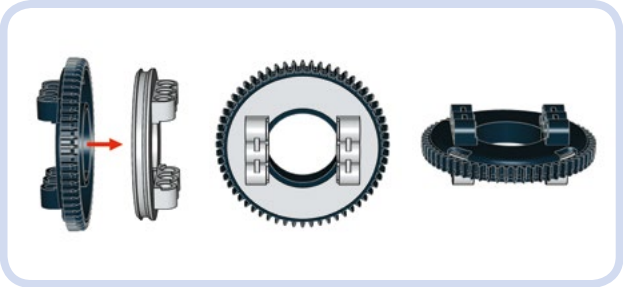
Die älteste Drehscheibe ist die größte. Sie ist fünf Noppen hoch (die Stiftlöcher oben und unten sind 5 Noppen voneinander entfernt) und der Durchmesser beträgt 7 Noppen. Das Loch in der Mitte hat genau die Größe eines Zahnrads mit 24 Zähnen und ist am Unterteil ebenfalls mit 24 Zähnen versehen. Zwischen den »Wänden« auf der Ober- und Unterseite besteht jeweils ein Abstand von 4 Noppen. Da dieses Element für die Noppenbauweise optimiert wurde, ist es heutzutage aus der Mode gekommen.

Große Technic-Drehscheibe mit 56 Zähnen ohne Noppen



Die 2004 eingeführte neue Version der großen Drehscheibe ist für die noppenlose Bauweise ausgelegt. Auch sie hat einen Durchmesser von 7 Noppen, die Höhe beträgt aber nur noch 3 Noppen. Die obere Hälfte verfügt über 56 rechteckige Stirnradzähne an der Außenseite. Das Loch in der Mitte hat fast die Größe eines Zahnrads mit 24 Zähnen, allerdings machen zwei gegenüberliegende Vorsprünge es etwas kleiner. Auf der unteren Hälfte weist das Loch 24 Zähne auf. Der Abstand zwischen den Aufbauten auf der Ober- und der Unterseite beträgt jeweils 3 Noppen. Um diesen kleineren Abstand zu verwirklichen, waren die Vorsprünge im Mittelloch notwendig. Dadurch lässt sich ein Zahnrad mit 24 Zähnen nur noch in die alte Drehscheibe mit Noppen einsetzen, aber nicht in diese Version.

Große Technic-Drehscheibe mit 60 Zähnen ohne Noppen



Die 2015 eingeführte große Technic-Drehscheibe mit 60 Zähnen ohne Noppen folgt dem Design der kleinen Drehscheibe. Sie ist 3 Noppen hoch bei einem Durchmesser von 7,5 Noppen (60 mm). Außen an der Oberhälfte befinden sich 60 Zähne, die ebenso wie bei der kleinen Drehscheibe an der zur Unterhälfte weisenden Seite abgeschrägt sind. Das Loch in der Mitte ist zahnlos und hat einen Durchmesser von 3 Noppen. Auch der Abstand zwischen den Aufbauten oben und unten beträgt jeweils 3 Noppen.

Diese Drehscheibe bietet bietet mehrere Vorteile: Sie lässt sich leicht mit einem Zahnrad mit 12 Zähnen antreiben (siehe Abb. 6-27), und da das Mittelloch keine Zähne aufweist, bietet es mehr Platz (und weniger Gefahren), um Pneumatikrohre oder -schläuche hindurch zu verlegen. Außerdem ist sie für höhere Lasten ausgelegt: Die beiden Hälften lösen sich nicht so leicht voneinander, und die Reibung zwischen ihnen ist weit geringer als in den Drehscheiben mit 56 Zähnen. Ebenso wie die kleine Drehscheibe lässt sich diese Variante jedoch auch nur schwer mit der Schnecke verzahnen.

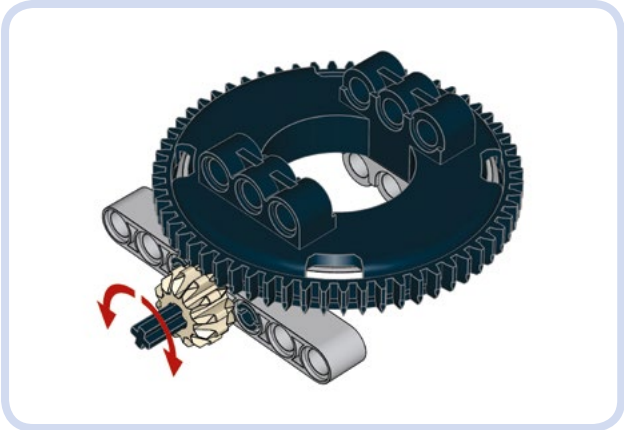
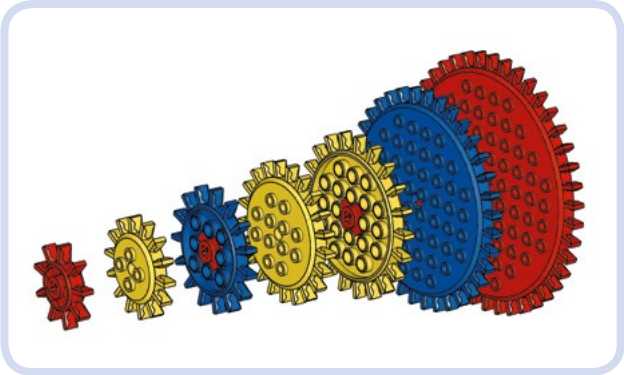


Abbildung 6-27: Wie die kleine Drehscheibe kann auch die große mit 60 Zähnen an der Unterseite mit einem Einzel- oder Doppelkegelrad mit 12 Zähnen verzahnt werden.

Veraltete Zahnräder



Diese Zahnräder entstammen zwei älteren Zahnradsystemen von LEGO, nämlich dem Samsonite-System von 1965 und dem 1970 eingeführten Expert-Builder-System. Es handelt sich um die Vorläufer des heutigen Technic-Systems, durch das sie 1977 ersetzt wurden. Seit diesem Zeitpunkt werden sie in LEGO-Bausätzen nicht mehr verwendet, sie lassen sich aber immer noch relativ problemlos aus zweiter Hand erwerben.

Eine Verzahnung ist sowohl eben als auch rechtwinklig möglich, allerdings immer nur mit Zahnrädern dieser Ära. Ihre Zähne sorgen wie bei Knebelrädern für einen unregelmäßigen Lauf. Diese Zahnräder sind massiv und bestehen aus einem sehr haltbaren Material. Einige verfügen sogar über Mittelstücke aus Metall, weshalb sich die kleinsten von ihnen bei Konstrukteuren großer Beliebtheit für Schwerlastanwendungen erfreuen. Die größeren werden aufgrund ihrer enormen Abmessungen kaum genutzt.

Pawel "Sariel" Kmiec, Das "inoffizielle" LEGO®-Technic-Buch, dpunkt.verlag, ISBN 978-3-86490-433-2