

# 10

## Das Pneumatiksystem von LEGO

Das Pneumatiksystem von LEGO ist eine Miniaturausgabe der Pneumatik- und Hydrauliksysteme der realen Technik. Es besteht aus drei grundlegenden Bauteilen: einem *Druckerzeuger*, z. B. einer Handpumpe oder einem Motorkompressor, einem *Steuermodul*, also einem oder mehreren Ventilen, die den Luftstrom steuern, und *Zylindern*, die den Druck in eine lineare Bewegung umwandeln. Diese Bauteile sind durch elastische Pneumatikschläuche miteinander verbunden, durch die die Luft zwischen den Komponenten strömen kann.

Das Funktionsprinzip der Pneumatik beruht auf der Neigung von Luft, von Gebieten mit hohem Druck zu denen mit niedrigem Druck zu strömen. Der Druckerzeuger füllt das Pneumatiksystem mit Druckluft, die dann über das Steuermodul in die Zylinder geleitet wird. Dadurch werden die Zylinder ausgefahren oder zusammengezogen. Ist der Druck im gesamten System gleich, tritt keine Bewegung mehr auf.

Eine Pneumatik hat immer nur eine begrenzte Druckkapazität. Bei LEGO-Modellen beträgt dieser Grenzwert gewöhnlich 3 bar, was ungefähr dem Dreifachen des normalen Atmosphärendrucks entspricht. Wenn ein LEGO-Druckerzeuger diesen Wert überschreitet, können die Schläuche von den Anschlüssen der Pneumatikbauteile abspringen.

Da beim LEGO-System Schläuche und Verbinder verwendet werden, ist es nicht perfekt abgeschlossen, und es können Mikrolecks auftreten. Durch *Mikrolecks* können winzige Mengen an Luft aus der Pneumatik austreten. Diese Undichtigkeiten treten gewöhnlich an Enden der Pneumatikschläuche auf (bei Beschädigungen auch in der Mitte). Dadurch sinkt der Wirkungsgrad. Wie bei jedem anderen mechanischen System ist auch bei der Pneumatik ein komplizierter Aufbau der Feind eines höheren Wirkungsgrads.

**HINWEIS** Technisch korrekt werden die Verbindungsstellen im LEGO-System als *Einlässe* und *Auslässe* bezeichnet, doch ich nenne sie hier der Einfachheit halber nur *Anschlüsse*.

Es gibt drei verschiedene LEGO-Pneumatiken, nämlich das alte, das neue und das V2-System. Wie wir in den nächsten Abschnitten sehen werden, weichen ihre Funktionsweisen ein wenig voneinander ab.

### Das alte System

Das alte LEGO-Pneumatiksystem (siehe Abbildung 10-1) wurde 1984 eingeführt und ist relativ kompliziert. Das Steuermodul besteht aus zwei miteinander kombinierten Bauteilen und einem Pneumatikschlauch, der den Druckerzeuger mit den Zylindern verbindet. Der letzte LEGO-Bausatz mit diesem System wurde zwar bereits 1987 hergestellt, doch ist dieses haltbare System immer noch gebraucht erhältlich.

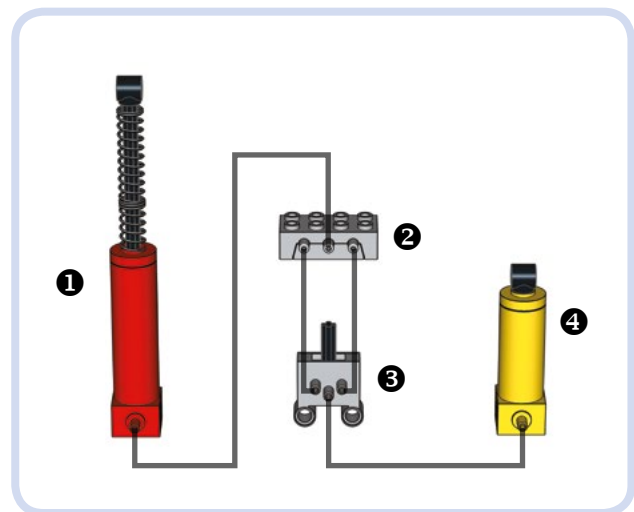


Abbildung 10-1: Beim alten pneumatischen System werden zwei Blöcke zur Steuerung des Luftstroms verwendet. Die grauen Linien in dieser Darstellung stehen für die Schläuche.

Die rot dargestellte *Pumpe* 1 verfügt gewöhnlich über eine Feder. Wird der Kolben niedergedrückt, pumpt sie Umgebungsluft durch ihren Anschluss. Die Feder sorgt dafür, dass der Kolben nach dem Loslassen wieder in seine Ruheposition zurückkehrt.

Das hellgraue Element ② ist ein *Verteilerblock*, der ein besonderes *Einwegventil* enthält. Luft strömt von der Pumpe zum mittleren Anschluss des Verteilerblocks, und das Einwegventil sorgt dafür, dass die beiden seitlichen Anschlüsse die Luft nur in einer Richtung weiterleiten. Der Anschluss auf der linken Seite saugt Luft an, der auf der rechten Seite stößt sie aus.

Das hellgraue Element ③ ist ein *Ventil*, das über zwei Schläuche an den Verteilerblock angeschlossen ist. Ein Verteilerblock kann mithilfe gegabelter Schläuche an mehrere Ventile angeschlossen werden. Die Gesamtzahl der Ventile hängt davon ab, wie viele Pneumatikzylinder unabhängig voneinander gesteuert werden sollen.

An dem Ventil befindet sich ein Hebel, der drei Stellungen einnehmen kann. Bei einer Position werden alle angeschlossenen Zylinder ausgefahren, bei der anderen eingefahren. Die dritte (mittlere) Stellung blockiert die Verbindung durch das Ventil, wodurch alle Zylinder gesperrt werden. Dies ist die *Neutralstellung*, die du in einem System mit vielen Ventilen brauchst, um zu verhindern, dass sich die Ventile gegenseitig beeinträchtigen.

Das gelbe Element ④ ist ein Zylinder, der ausfährt, wenn Luft in ihn hineingepumpt wird, und sich zusammenzieht, wenn sie aus ihm herausgesaugt wird.

**HINWEIS** Beim Ansaugen sinkt der Luftdruck innerhalb des Zylinders, bis er unter den Umgebungsdruck (1 bar) fällt. An diesem Punkt beginnt der Zylinder, sich zusammenzuziehen. Daher kann das LEGO-Pneumatiksystem zum Ausfahren bis zu 3 bar ausüben, zum Einfahren aber nur maximal 1 bar.

Im Vergleich mit den anderen Pneumatiksystemen bietet das alte System folgende Vorteile:

- \* Es ist nur ein Schlauch zur Verbindung eines Zylinders mit einem Ventil erforderlich.
- \* Zylinder sind in Gelb und in Rot erhältlich.

Allerdings weist es auch mehrere Nachteile auf:

- \* Für jedes an den Verteilerblock angeschlossene Ventil sind zwei Schläuche erforderlich, was das System ziemlich kompliziert macht.
- \* Zum Einfahren eines Zylinders wird weniger Kraft aufgewendet als zum Ausfahren. Das kann dazu führen, dass einige Funktionen zu wenig Kraft ausüben.
- \* Es gibt viele Sonderteile (z. B. der Verteilerblock), die seit 1987 nicht mehr hergestellt werden und nur noch gebraucht erhältlich sind.
- \* Das System ist nur begrenzt mit den neueren kompatibel.

## Das neue System

LEGO hat das neue Pneumatiksystem (siehe Abbildung 10-2) 1989 zur Vereinfachung und zur Steigerung des Wirkungsgrads eingeführt. Beim neuen System fällt der Verteilerblock weg, außerdem wurden Pumpen und Zylinder neu konstruiert. Die alten Ventile sind jedoch nach wie vor in Verwendung. Das neue System ähnelt viel deutlicher echten Pneumatik- und Hydraulikanlagen.

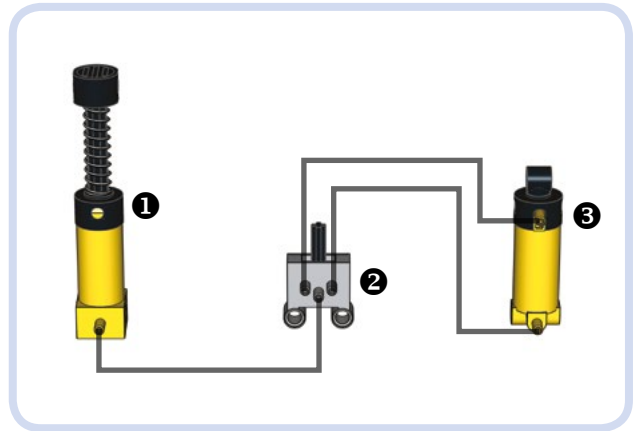


Abbildung 10-2: Das neue Pneumatiksystem ist einfach konstruiert.

Das gelbe Element ① in Abbildung 10-2 ist eine Pumpe, die nur im neuen System verwendet werden kann. Bei dem hellgrauen Ventil ② handelt es sich um das gleiche Bauteil wie im alten System, allerdings wird es anders angeschlossen: Luft strömt durch den mittleren Anschluss ein, und die seitlichen Anschlüsse sind mit dem Zylinder verbunden. Welcher Anschluss des Ventils mit welchem Anschluss des Zylinders verbunden ist, bestimmt, welche der beiden äußeren Ventilstellungen für das Ausfahren und welche für das Einfahren des Zylinders sorgt.

Das gelbe Element ③ ist der Zylinder. Je nachdem, über welchen Anschluss Luft einströmt, wird er ein- oder ausgefahren.

Anders als beim alten System wird beim neuen Luft durch die Ventile ausgestoßen, was beim Schalten unter hohem Druck Pfeifgeräusche verursacht. Da beim neuen System zum Einfahren keine Luft angesaugt wird, erfolgt dieser Vorgang fast mit gleicher Kraft wie das Ausfahren.

**HINWEIS** Du kannst die Zylinder jeweils auch im anderen System verwenden, allerdings zeigen die Zylinder des alten Systems aufgrund ihres inneren Aufbaus eine schwache Leistung.

Gegenüber dem alten System bietet das neue folgende Vorteile:

- \* Das Steuermodul ist einfacher aufgebaut (kein Verteilerblock).
- \* Zum Ein- und Ausfahren der Zylinder wird fast die gleiche Kraft aufgewendet.
- \* Die Teile sind gut erhältlich, denn dies ist bis heute das am häufigsten produzierte System.
- \* Zwei große Zylinder können kombiniert werden, um eine doppelte Reichweite zu erzielen.
- \* Vollständig kompatibel mit dem V2-System.

Es hat jedoch auch folgende Nachteile:

- \* Für jeden Zylinder müssen zwei Schläuche mit dem Ventil verbunden werden.
- \* Die Zylinder gibt es gewöhnlich nur in Gelb.

## Das V2-System

Das 2015 eingeführte V2-System ist keine vollständige Neukonstruktion, sondern nur eine Modernisierung des neuen Systems. Die V2-Pneumatikteile haben stufig ausgeführte Anschlüsse und verstärkte Spitzen (siehe Abb. 10-3). Außerdem gibt es neue, längere Zylinder. Die Schläuche bestehen aus einem elastischeren Material und lassen sich besser anschließen. Trotz all dieser Verbesserungen ist das V2-System zu 100 % kompatibel mit dem neuen System und funktioniert nach demselben Prinzip.



Abbildung 10-3: Ein kleiner Pneumatikzylinder aus dem neuen System (oben) und aus dem V2-System (unten). Größe, Fassungsvermögen und Leistung sind identisch, aber die V2-Version hat verstärkte Spitzen und gestufte Anschlüsse. Letztes erleichtert das Aufstecken der Schläuche.

Im Vergleich zu den anderen Pneumatiksystemen bietet das V2-System folgende Vorteile:

- \* Die Schläuche lassen sich leichter auf die Anschlüsse aufstecken.
- \* Es sind längere Zylinder erhältlich.
- \* Dieses System ist mit dem neuen System vollständig kompatibel.

Allerdings weist es die folgenden Nachteile auf:

- \* Die Teile sind selten und teuer. Zurzeit gibt es V2-Elemente nur in zwei LEGO-Bausätzen, von denen der billigere ca. 120 Euro kostet.
- \* Alle Zylinder sind gelb.
- \* Es gibt keine Möglichkeit, zwei lange Zylinder zu verbinden.

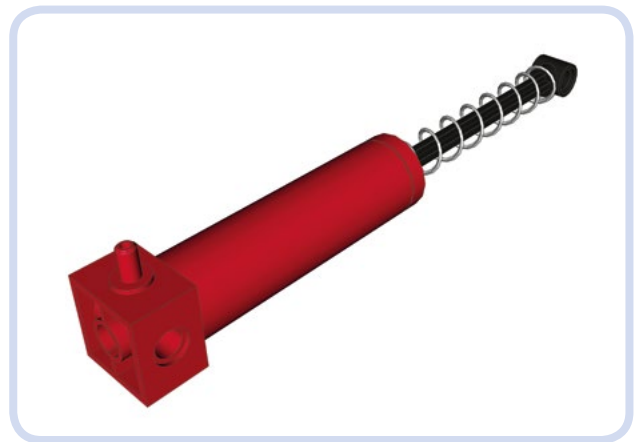
## Bestandsaufnahme der Pneumatik-Bauteile

Da die meisten Pneumatik-Bauteile für mehr als nur ein System verwendet werden können, sind sie in der nachfolgenden Aufstellung nach ihrer Funktion geordnet: Pumpen, Steuermodule, Zylinder und sonstige Teile. Das System, aus dem das Teil jeweils stammt, ist in Klammern hinter dem Namen angegeben. Innerhalb einer Kategorie sind die Elemente von den ältesten zu den neuesten angeordnet.

### Pumpen

Alle Pneumatikpumpen können heißlaufen, wenn sie längere Zeit schnell arbeiten. Die großen Pumpen können einen höheren Druck erzeugen als die kleinen (mehr als 2 bar im Gegensatz zu maximal 0,8 bar). Aus Sicherheitsgründen entweicht die Luft aus der Pumpe, wenn ein Grenzwert für den Druck überschritten ist. Dieser Grenzwert hängt vom jeweiligen Pumpentyp ab.

#### Große Pneumatikpumpe (alt)



Die große Handpumpe hat einen einzelnen Anschluss und einen gefederten Kolben. Sie ist 11 Noppen lang (wobei es auch eine seltene Variante mit einer 13-Noppen-Kolbenstange gibt) und in den Farben Rot und Gelb erhältlich. Wird der Kolben niedergedrückt, saugt die Pumpe Umgebungsluft ein. Beim Loslassen des Kolbens

führt die Feder ihn wieder in die ursprüngliche Neutralstellung zurück.

Der Unterbau der Pumpe kann auf Noppenelemente aufgesteckt werden. Beide Enden verfügen über reguläre Technic-Löcher. Das untere Ende (an dem sich der Anschluss befindet) hat das Format von 2x2 Noppen, das obere von 1x1 Noppe. Die Form des oberen Endes ist zum manuellem Pumpen schlecht geeignet, da es unangenehm gegen den Finger drückt.

### **Große Pneumatikpumpe (neu)**



Die große Handpumpe des neuen Systems ist gewöhnlich gelb. Es gibt auch eine sehr seltene Variante in durchsichtigem Hellblau. Wie die Pumpe des alten Systems weist sie einen Anschluss und einen feder gelagerten Kolben auf. Sie funktioniert wie die alte Pumpe und weist auch fast dieselben Abmessungen auf. Am oberen Ende ist jedoch eine Kontaktfläche angebracht. Dadurch ist es bequemer, die Pumpe mit dem Finger zu bedienen, als beim alten System.

### **Kleine 5,5L-Pneumatikpumpe (neu)**



Diese kleine Pumpe hat einen Anschluss und einen Kolben, der zwei Noppen weit herausragt, aber keine Feder aufweist. Am besten wird sie in Verbindung mit einem Motorkompressor eingesetzt und nicht als Handpumpe. Da sie ein viel geringeres Pumpvolumen hat als die anderen Modelle, dauert es länger, bis ein vergleichbarer Druck erreicht ist. Dadurch laufen diese Pumpen zwar nicht so leicht heiß, sind aber auch weniger effizient. Aus diesem Grund enthalten Motorkompressoren meistens mehr als eine dieser Pumpen. Die Pumpe wird in Gelb, Blau und transparentem Hellblau hergestellt.

### **Kleine 6L-Pneumatikpumpe (neu)**



Diese 2011 eingeführte Pumpe soll die 5,5L-Pumpe ersetzen und ist bis auf die Länge mit ihr identisch. Der Kolben fährt ebenfalls 2 Noppen weit aus, aber da der Abstand zwischen Boden und Spitze jetzt volle 6 Noppen beträgt und es keinen Versatz um eine halbe Noppe mehr gibt, lässt sie sich leichter verwenden. Trotz der vergrößerten Länge sind Pumpvolumen und Effizienz gegenüber der 5,5L-Version unverändert. Es gibt diese Pumpe nur in Hellgrau.

Mit dem Bausatz 8110 kam 2011 eine neue Version auf den Markt. Sie ist hellgrau und um eine halbe Noppe länger, was die Kapazität ein wenig erhöht.

### **Kleine 6L-Pneumatikpumpe (V2)**

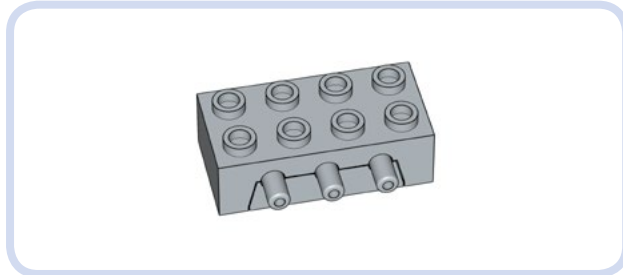


Die kleine 6L-Pumpe des V2-Systems ist fast identisch mit der aus dem neuen System. Der einzige Unterschied ist der stufig ausgeführte Anschluss. Es gibt sie nur in Blau, und im Gegensatz zu allen anderen kleinen Pumpen ist auch der Unterbau blau.

## Steuermodule

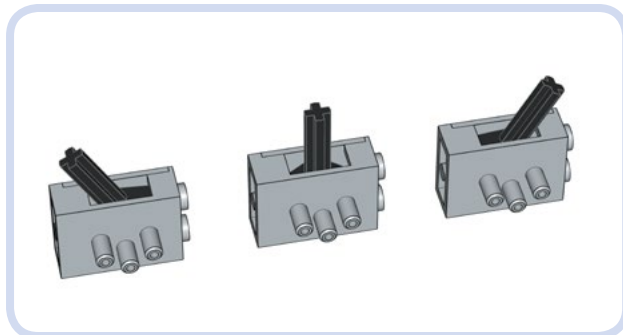
In diesem Abschnitt geht es um die Elemente, die die Bewegung der Pneumatikzylinder steuern. Das sind vor allem die Ventile, von denen es zwei Varianten gibt. Im alten System gab es außerdem den Verteilerblock, der allerdings mehr zur Verlegung der Schläuche diente und keine Steuermöglichkeiten bot.

### Verteilerblock (alt)



Der Verteilerblock ist ein hellgraues Element von derselben Größe wie ein 2x4x1-Stein. Er wird ausschließlich im alten System verwendet, um die Pumpen mit den Ventilen zu verbinden, und wird seit 1987 nicht mehr hergestellt. An einer Seite befinden sich drei Anschlüsse, wobei der mittlere der Lufteinlass ist. Ein Einwegventil in seinem Innern regelt die Funktionsweise: Am mittleren Anschluss kann Luft in beide Richtungen strömen, am linken nur hinein- und am rechten nur hinausströmen. Bei falschem Anschluss sperrt das Ventil, wobei die Luftzirkulation innerhalb des Blocks komplett aufhört. Das Ventil öffnet sich erst dann wieder, wenn die Anschlüsse korrekt verbunden sind. An diesen Block kannst du jeden Typ von Pneumatikventil anschließen, also solche aus dem alten, dem neuen und dem V2-System.

### Ventil mit Noppen (alt und neu)



Das Ventil hat die Größe eines 1x2-Steins mit einer aufgesteckten 1x2-Platte und ist stets hellgrau. An einer Seite befinden sich drei Anschlüsse, wobei der mittlere der Lufteinlass ist.

Der etwa 1,5 Noppen lange Hebel an einer der Schmalseiten kann drei verschiedene Stellungen einnehmen. In der mittleren Position (Neutralstellung) wird die Verbindung innerhalb des Ventils blockiert, wodurch die Seitenanschlüsse letztlich vom Rest der Pneumatikanlage abgetrennt werden. Die obere und untere Stellung regelt den Luftstrom durch die Seitenanschlüsse des Ventils (siehe Abbildung 10-4), um die daran angeschlossenen Zylinder entweder aus- oder einzufahren. (Das Ventil saugt nicht aktiv Luft ein, sondern empfängt lediglich Luft durch seine Anschlüsse und gibt sie durch ein Loch im Schaltergehäuse frei.)

Diese Ventile können auf oder unter jedes LEGO-Element mit Noppen gesteckt werden. Sie lassen sich auch zwischen zwei Technic-Steine der Größe 1x2 montieren, deren Stiftlöcher dann genau 3 Noppen auseinanderliegen (siehe Abbildung 10-5).

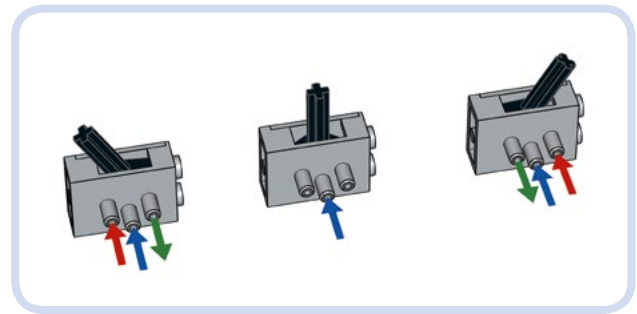


Abbildung 10-4: Die Richtung des Luftstroms an den Anschlüssen des Ventils: Die blauen Pfeile zeigen den Luftstrom von der Pumpe an, die grünen den Luftstrom vom Ventil zum Zylinder und die roten den vom Zylinder zum Ventil.

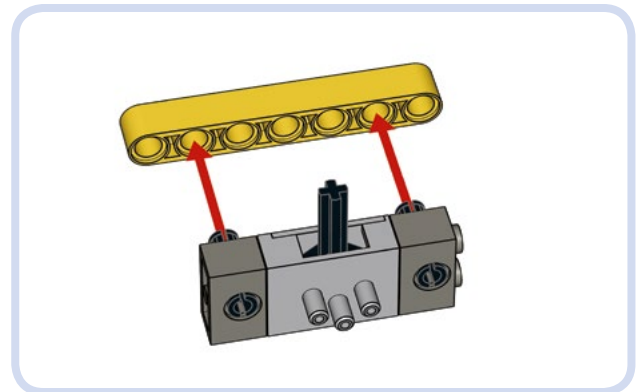
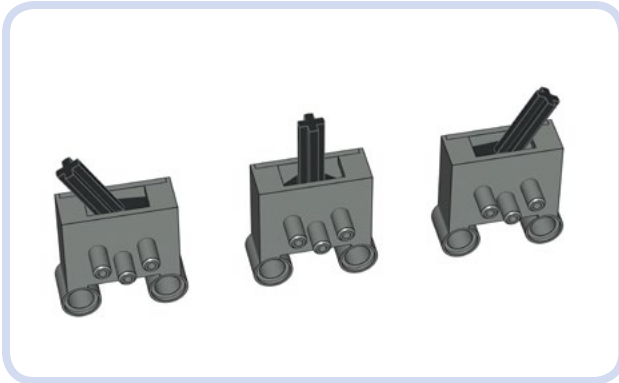


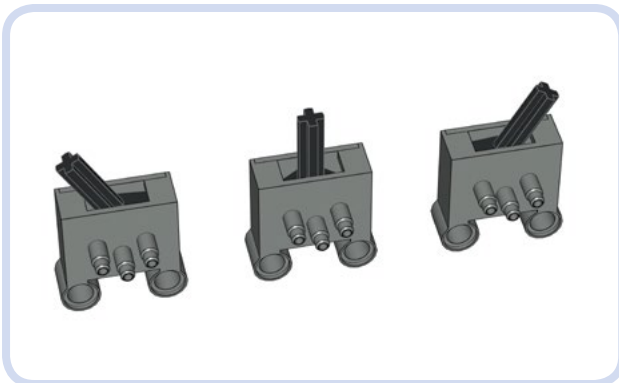
Abbildung 10-5: Wenn du an den beiden Enden des Ventils je einen 1x2-Technic-Stein anbringst, kannst du das Ventil an einen Stein oder Balken mit mindestens fünf Stiftlöchern anschließen.

### **Noppenloses Ventil (neu)**



Das neue Ventil wurde 2003 eingeführt und funktioniert genauso wie das Ventil mit Noppen. Abgesehen von der Farbe (dunkelgrau) besteht der einzige Unterschied darin, dass es keine Noppen aufweist, dafür aber an einer Seite zwei Stiftlöcher im Abstand von einer Noppe. Durch diese Änderungen ist es besser für noppenlose Konstruktionen geeignet. Da sich die Verbindungspunkte des Ventils auf der Seite befinden, die dem Hebel gegenüberliegt, bleibt der Hebel auch dann bequem zugänglich, wenn das Ventil an andere Teile angebaut ist.

### **Noppenloses Ventil (V2)**



Dieses Ventil ist bis auf die gestuften Anschlüsse identisch mit dem des neuen Systems.

### **Zylinder**

Die Zylinder aus dem neuen und dem V2-System sind vollständig miteinander kompatibel und können zwischen den Systemen ausgetauscht werden. Dagegen sind die Zylinder des alten Systems nur begrenzt kompatibel.

### **Mittelgroßer Zylinder (alt)**



Dieser Zylinder aus dem alten System weist einen einzigen Anschluss und einen Plastikkolben auf, der um fast 4 Noppen ausgefahren werden kann. Der Unterbau kann auf Noppen oder mithilfe von Stiften befestigt werden. Der Zylinder ist in Gelb und Rot erhältlich, und seine Abmessungen entsprechen denen der alten großen Pumpe. Im Gegensatz zu ihr hat er jedoch keine Feder. Der obere Teil des Zylinders stößt beim Ausfahren Luft aus und saugt sie beim Einfahren aus der Umgebung ein. Zum Ausfahren übt der Zylinder mehr Kraft auf als zum Einfahren. Im neuen Pneumatiksystem ist er nur von begrenztem Nutzen, da er zwar aus-, aber nicht eingefahren werden kann.

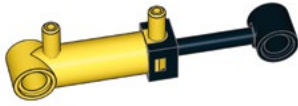
### **Großer 9L-Zylinder (alt)**



Bei diesem Zylinder handelt es sich im Grunde genommen nur um eine verlängerte Version des mittelgroßen Zylinders aus dem alten System. Er verfügt über einen einzelnen Anschluss und über einen Kolben, der 6 Noppen weit ausgefahren werden kann. Wegen des Plastikkolbens und der großen Ausfahrlänge kann er unter Last schneller brechen als jeder andere Zylinder.

Wie bei allen Zylindern des alten Systems stößt auch hier der obere Teil beim Ausfahren Luft aus und saugt sie beim Einfahren aus der Umgebung ein. Zum Ausfahren übt er mehr Kraft aus als zum Einfahren. Wie der mittelgroße Zylinder ist auch er im neuen System nur bedingt nützlich, da er dort nicht eingefahren werden kann.

### **Kleiner Zylinder (neu)**



Der kleine Zylinder des neuen Systems verfügt über zwei Anschlüsse und über einen Plastikkolben, der 2 Noppen weit ausgefahren werden kann. Es gibt ihn in Gelb und in transparentem Hellblau.

Dieses kleine und teure Pneumatikelement lässt sich leicht mit der kleinen Pneumatikpumpe verwechseln. Aufgrund der niedrigen Kapazität kann dieses Teil keine große Kraft ausüben, es wird aber wegen seiner geringen Größe geschätzt.

### **Mittelgroßer Zylinder mit viereckigem Unterbau (neu)**



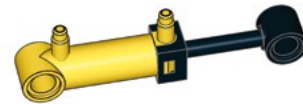
Der mittelgroße Zylinder des neuen Systems hat zwei Anschlüsse und einen stabilen Metallkolben, der fast 4 Noppen weit ausgefahren werden kann. In der Größe ähnelt er der großen Pneumatikpumpe. Der Unterbau kann auf Noppen oder mithilfe von Stiften befestigt werden.

### **Mittelgroßer Zylinder mit rundem Unterbau (neu)**



Diese modernisierte Version des mittelgroßen Zylinders wurde 2002 eingeführt. Auch sie hat zwei Anschlüsse und einen um fast 4 Noppen ausfahrbaren Metallkolben. Der einzige Unterschied zwischen diesem Zylinder und dem Vorgängermodell ist der Unterbau, der hier rund statt eckig ausgeführt ist. Er kann nicht auf Noppensteinen montiert, aber mit Stiften befestigt werden. Um den Zylinder neigen zu können, ist rund um seinen Unterbau jedoch weniger Platz erforderlich, weshalb er sich in den meisten Fällen besser einbauen lässt als das Gegenstück mit viereckigem Unterbau.

### **Kleiner Zylinder (V2)**



Der kleine V2-Zylinder ist identisch mit dem kleinen Zylinder des neuen Systems. Die einzigen Unterschiede bestehen in den abgestuften Anschlüssen und dem verstärkten Oberteil. Außerdem gibt es ihn wie alle V2-Zylinder nur in Gelb.

### **Großer 1x1-Zylinder (V2)**



Dieser Zylinder stellt einen neuen Typ dar. Er verfügt über zwei gestufte Anschlüsse und einen Metallkolben. Breite und Tiefe betragen nur jeweils 1 Noppe, aber er ist 11 Noppen lang und kann auf erstaunliche 17 Noppen ausgefahren werden. Zwar ist dieser Zylinder sehr stabil und bietet eine beeindruckende Reichweite, doch leider kann der dünne Körper nur wenig Kraft ausüben, nämlich ungefähr genauso wenig wie der kleine Zylinder. Wenn die Reichweite wichtiger ist als die Kraft, ist dieses Teil jedoch trotzdem sehr nützlich.

## Großer 2x2-Zylinder (V2)

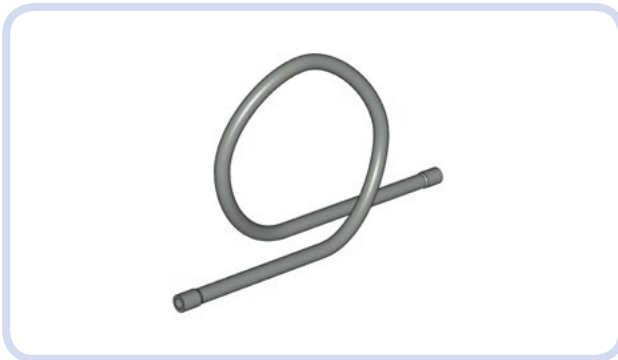


Dieses Teil kombiniert die Merkmale des großen 1x1-Zylinders und der mittelgroßen Zylinder, allerdings mit einem leicht abgewandelten Unterbau. Wie der 1x1-Zylinder hat er zwei gestufte Anschlüsse und einen Metallkolben und ist im eingefahrenen Zustand 11 Noppen, im ausgefahrenen Zustand dagegen 17 Noppen lang. Aufgrund des dickeren Rumpfs hat er nicht nur eine große Reichweite, sondern kann auch viel Kraft ausüben. Der Rumpf hat zwar einen Querschnitt von 2x2 Noppen, die Enden aber nur von 1x1 Noppe.

### Sonstige Teile

In diesem Abschnitt sehen wir uns einige zusätzliche Elemente für verschiedene Zwecke an. Einige davon, etwa die Schläuche, sind für jedes Pneumatiksystem unverzichtbar. Es sind aber auch hochspezialisierte und optionale Teile darunter, etwa die Klammern zum Zusammenbauen zweier mittelgroßer Zylinder.

### Pneumatikleitungen und -schläuche



Der 4 mm dicke, elastische Gummischlauch ist ein entscheidendes Element des Technic-Pneumatiksystems. Es gibt ihn in verschiedenen Längen und Farben – Schwarz, Grau, Weiß und Blau –, und er lässt sich leicht durch die Löcher in Technic-Bauteilen führen und mit den Anschlüssen des Pneumatiksystems verbinden.

Denke bei der Verwendung dieser Schläuche daran, dass die LEGO-Pneumatik keinen hohen Luftdruck über einen längeren Zeitraum hinweg aufrechterhalten kann und dass die Schläuche

nicht ganz dicht sind. Das System wird also umso ineffizienter, je mehr Schläuche es enthält. Außerdem neigen die Schläuche dazu, bei einem Druck von über 3 bar von den Anschlüssen abzuspringen. Bei gedehnten oder beschädigten Schläuchen kann dies sogar bei geringerem Druck passieren. Die ältesten Schläuche, die heute nur noch selten zu finden sind, bestanden aus einem Material, das sich unter der Einwirkung von UV-Licht nach und nach zersetzt, was zu Rissen und Undichtigkeiten führte. Die neueren Schläuche sind aus Silikon gefertigt und gegen solche Einflüsse größtenteils immun. Für die V2-Schläuche wird wiederum ein neues Material verwendet, weshalb sie elastischer sind und sich leichter auf die Anschlüsse aufstecken lassen.

Mit den 4-mm-Schläuchen ist es einfach, Luft durch beliebig komplizierte Pneumatikanlagen zirkulieren zu lassen. Sie nehmen auch nur wenig Platz ein. Durch ihre Flexibilität und Nachgiebigkeit können sie entlang von Bauteilen verlegt werden, die sich bewegen müssen. Allerdings ist der eigentliche Luftkanal im Innern der Schläuche schmal und kann daher leicht blockiert werden. Um dies zu vermeiden, musst du darauf achten, dass die Schläuche nicht von den umgebenden Strukturen zusammengedrückt und auch nicht gedehnt oder geknickt werden.

In Abbildung 10-6 siehst du einen Pneumatikschlauch, der mit zwei Pneumatikelementen verbunden ist. An der Stelle, an der der Schlauch über den Anschluss gestülpt wird, wächst sein Durchmesser auf mehr als eine Noppenlänge an. Daher passt der Teil des Schlauchs, der den Anschluss umfasst, nicht mehr durch ein Technic-Loch.

Pneumatikschläuche können nicht nur mit Anschlüssen verbunden werden, sondern auch mit 3 mm dicken, starren Rohren. Damit lassen sich mehrere Schläuche zu einem längeren verbinden.

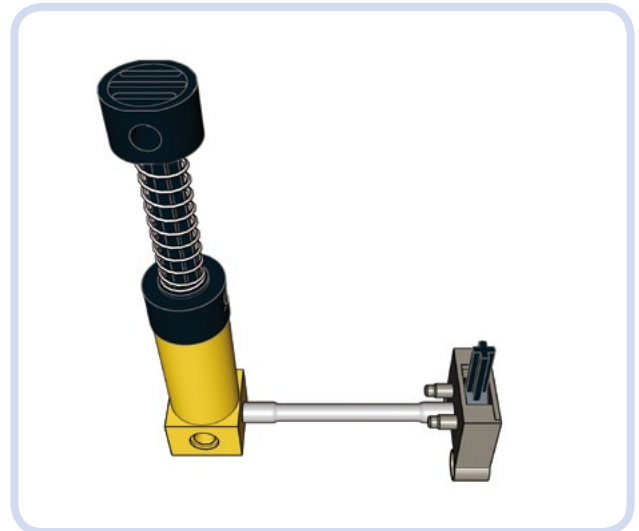


Abbildung 10-6: Ein Schlauch zwischen einer Pumpe und einem Ventil



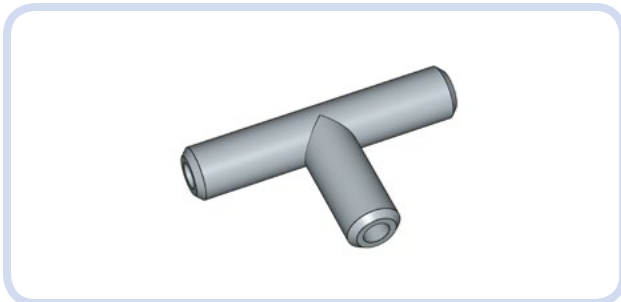
Bei echten Hydraulik- und Pneumatiksystemen werden sowohl *Schläuche* verwendet, also flexible Leitungen, als auch starre *Rohre*. Um diese Terminologie zu übernehmen, verwende ich ebenfalls den Begriff Schlauch für die flexiblen Silikonverbindungen und Rohr für die starren 3-mm-Leitungen. In Abbildung 10-3 siehst du, wie du mit einem 3-mm-Rohr zwei Pneumatikschläuche verbinden kannst. Diese Rohre lassen sich aber auch an jegliche Noppenstrukturen anschließen, z. B. an Steine, und zwar auf eine Weise, die mit den normalen Schläuchen nicht möglich wäre.



Abbildung 10-7: Hier verbindet ein Rohr zwei Schläuche und ist selbst mithilfe zweier 1x1-Kacheln mit Klammern auf einen Technic-Stein aufgesteckt.

**HINWEIS** Bei echten Maschinen mit Pneumatik- oder Hydraulikanlage werden die Leitungen häufig in Form starrer Rohre an unbeweglichen Strukturen entlang geführt, z. B. am Ausleger eines Krans. Mithilfe der 3-mm-Rohre lassen sich solche Konstruktionen sehr leicht mit LEGO-Steinen nachbauen.

### T-Stück (alt)



Die alte Version des T-Stücks, die seit 1996 nicht mehr hergestellt wird, ist einfach ein T-förmiges Element mit drei Anschlüssen. Wenn Luft durch einen Anschluss hineingepumpt wird, strömt sie durch die beiden anderen Anschlüsse wieder heraus. Das T-Stück kann also als Verbinder für pneumatische Parallelschaltungen dienen.

Jeder Anschluss wird mit einem Schlauch verbunden, sodass die Pneumatikleitung in zwei Teile aufgespalten wird (siehe Abbildung 10-8). Zwei der Schläuche sind dabei zu einem einzigen Abschnitt kombiniert, in dessen Mitte sich das T-Stück befindet. Der dritte Schlauch, der davon abgeht, stellt die Verzweigung dar. Da jedes T-Stück eine neue Verzweigung in einer Pneumatikleitung eröffnet, brauchst du drei Teile dieser Art, um eine Leitung in vier Teile aufzuspalten. Das erste teilt die Leitung in zwei Abschnitte auf, die dann jeweils durch die beiden anderen T-Stücke abermals in je zwei Teile aufgespalten werden. Allgemein gilt die Regel, dass zur Aufteilung einer Leitung in  $n$  Abschnitte  $(n - 1)$  T-Stücke erforderlich sind.

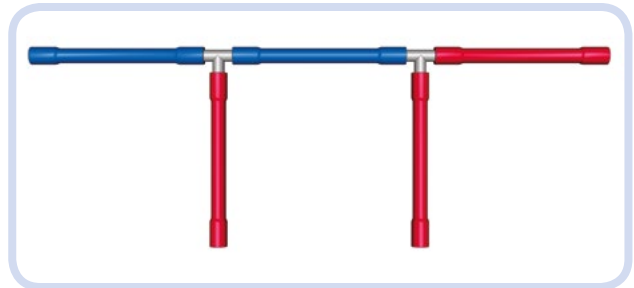
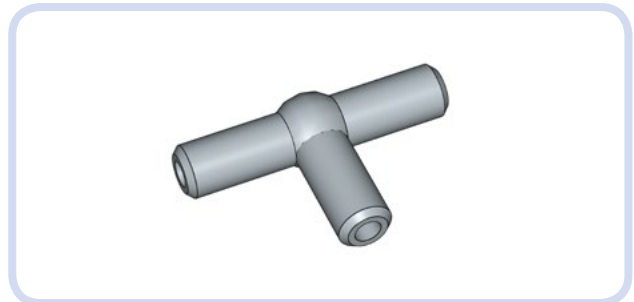


Abbildung 10-8: Mit zwei T-Stücken kann eine einzelne Leitung (blau) in drei einzelne Abschnitte aufgeteilt werden (rot).

**HINWEIS** Die Aufspaltung der Leitungen senkt den Wirkungsgrad der Pneumatikanlage, da beim Abknicken um 90° ein Luftwiderstand auftritt.

### T-Stück (neu)



Die modernisierte Version des T-Stücks hat ein kugelförmiges Mittelteil, sodass sich die Schläuche leichter abziehen lassen. Diese Variante funktioniert genauso wie die alte Version, ist aber robuster und senkt ein kleines bisschen den Luftwiderstand. Alle T-Stücke sind hellgrau.

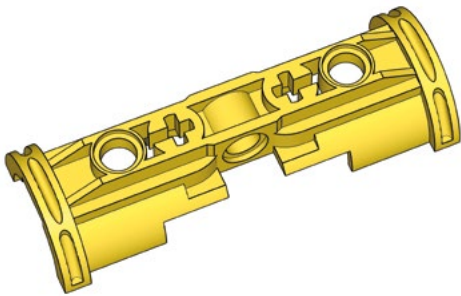
## Schlauchanschluss mit Achsverbinder (neu)



Dieses Element wurde 2011 eingeführt. Es ähnelt ein wenig einem T-Stück, dient aber nicht zum Aufteilen, sondern zum Erweitern von Leitungen.

Es kann zwei Pneumatikschläuche so zusammenschließen, dass sie leicht wieder abgezogen werden können. Damit ist es möglich, zwei Pneumatikanlagen auf einfache Weise zu verbinden und zu trennen. Aufgrund seiner Konstruktion ist dieses Bauteil äußerst praktisch für pneumatische Zapfwellen, mit denen externe Anbaugeräte wie pneumatische Schneepflüge oder Ladekräne angetrieben werden. Auch viele Landmaschinen weisen Zapfwellen auf. Beispielsweise können bei Traktoren daran verschiedene Anbaugeräte angeschlossen werden. Mit diesem Teil kannst du ebenfalls verschiedene pneumatische Anbaugeräte an das Hauptpneumatiksystem anschließen.

## Zylinderklammern (neu)



Die mittelgroßen Zylinder mit einem Ausfahrbereich von knapp 4 Noppen sind für manche Zwecke zu kurz. Die Lösung besteht darin, zwei Zylinder wie in Abbildung 10-9 mit einer Klammer zu verbinden, sodass sie wie einer wirken. Die Kolben fahren dabei nach beiden Seiten aus, was Länge und Ausfahrbereich verdoppelt. Beachte, dass diese Klammern nur für Zylinder mit rundem Unterbau geeignet sind. Es gibt sie außerdem nur in Gelb.

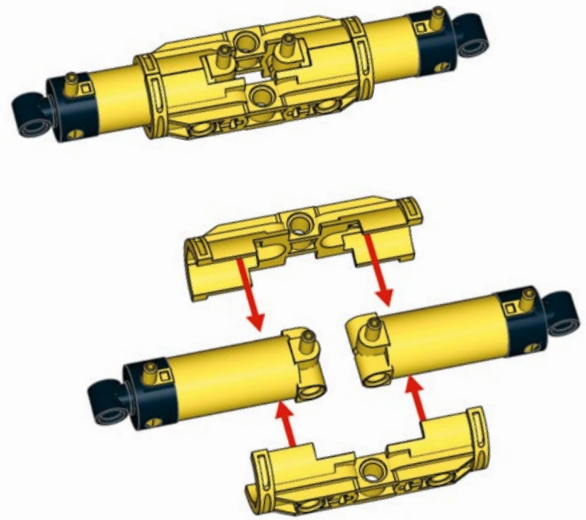


Abbildung 10-9: Zusammenschluss zweier Zylinder mit Klammern: fertige Ansicht (oben) und Montage (unten).

Die Klammern sind symmetrisch. Es ist möglich, einen Zylinder mit den Anschlüssen nach oben und den anderen mit den Anschlüssen nach unten zusammenzubauen, doch ist es zum Verbinden der Schläuche einfacher, wenn alle Anschlüsse auf derselben Seite liegen. Damit die Zylinder als Einheit wirken können, musst du ihre unteren und oberen Anschlüsse jeweils mit Schläuchen verbinden, die mithilfe von T-Stücken von der Leitung abgespaltert sind.

Abbildung 10-10 zeigt zwei Klammern und zwei Zylinder, die mithilfe von zwei Achsen und zwei 3L-Balken mit Stiften zusammengesteckt sind. Klammern können nicht direkt mit Zylindern oder miteinander verbunden werden. Um sie aneinander anzuschließen, musst du entweder Achsen durch die Achslöcher führen oder Stifte in die mittleren Löcher stecken und mit 3L-Balken verbinden. Die Befestigung mit Stiften und Balken ist haltbarer, da sie verhindert, dass sich die Klammern lösen. Allerdings werden dadurch die Mittellöcher der Klammern belegt, die häufig besser zur Verlegung der Schläuche genutzt werden.

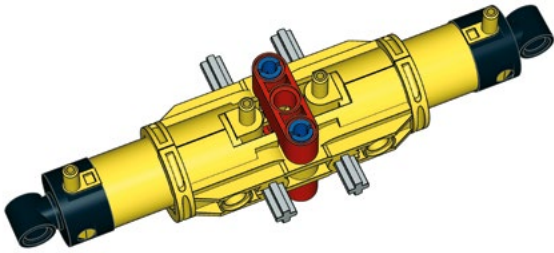


Abbildung 10-10: Zwei festgesteckte Klammern um zwei Zylinder

### Lufttank (neu)



Der Lufttank speichert komprimierte Luft. Er ist in Blau und Weiß erhältlich und sehr praktisch für Pneumatikanlagen, bei denen du nicht ständig die Pumpe betätigen willst. Mit ein wenig Bastelarbeit kannst du Pneumatikschläuche auch an Plastikflaschen oder -beutel anschließen und diese als Luftbehälter verwenden. Der Tank ist jedoch das einzige LEGO-Originalteil für diesen Zweck.

**HINWEIS** Die Kapazität einer pneumatischen Anlage ist das Volumen, das mit Druckluft gefüllt werden kann. Dieses Volumen wird gewöhnlich durch die Schläuche bestimmt. Wenn du viele lange Schläuche hast, steigt die Kapazität dadurch erheblich. Die Kapazität des Lufttanks ist jedoch weit größer als die irgendeiner Anzahl von Schläuchen.

Damit die Luft im Tank für die gesamte Pneumatikanlage zur Verfügung steht, musst du den Behälter zwischen der Druckversorgung und dem Steuermodul anbringen. Denke daran, dass es keine Beschränkungen dafür gibt, wie viel Luft aus dem Tank austreten kann. Daher musst du die Ventile sorgfältig steuern, um den Behälter allmählich zu entleeren. Ein einziger Fehler kann dazu führen, dass die gesamte Druckluft in einen einzigen Zylinder gelangt, was eine sehr schnelle Bewegung zur Folge hat.

Laut Angabe von LEGO sind zum vollständigen Füllen des Tanks 30 bis 35 Arbeitstakte der großen Pneumatikpumpe erforderlich. Bei etwa 40 Arbeitstakten erreicht der Druck den kritischen Wert von 3 bar, wobei entweder die Pumpe aufhört zu arbeiten oder die Schläuche von den Anschlüssen springen. (Wenn eine Beschädigung auftritt, entweicht die Luft innerhalb eines Sekundenbruchteils aus dem Tank.)

Der Lufttank sieht zwar ganz einfach aus, hat aber in Wirklichkeit einen sehr aufwendigen Aufbau. Unten gibt es eine Verbindungsfläche der Größe 2x4, die auf beliebige Steine und Platten aufgesteckt werden kann. Zur Verbindung mit Elementen, die größer sind als 2x4, musst du eine 2x4-Platte dazwischenbauen (siehe Abbildung 10-11).

Der Tank weist auch fünf Achslöcher von einer Noppenlänge Tiefe auf, mit deren Hilfe du den Behälter auf Achsen oder Achsstiften montieren kannst. Drei dieser Löcher befinden sich an der unteren Verbindungsfläche, die beiden anderen jeweils in der Mitte der beiden Schmalseiten.



Abbildung 10-11: Da sich die Verbindungsfläche in einer Vertiefung im Tankboden befindet, musst du eine 2x4-Platte als Abstandshalter verwenden, um den Tank auf einer 4x8-Platte montieren zu können.

## Manometer (neu)



Das Manometer wurde 2008 eingeführt und zeigt den Luftdruck in einer pneumatischen Anlage sowohl in Bar als auch in Pfund pro Quadratzoll (psi) an. Es ist in ein halbdurchsichtiges Gehäuse der Größe 5x8x3 eingeschlossen und weist unten einen Metallanschluss auf. Zur Befestigung verfügt es über sechs Stiftlöcher mit einer Tiefe von 2 Noppenlängen.

Um mit dem Manometer den Luftdruck in einer Pneumatikanlage zu messen, musst du es zwischen der Druckversorgung und dem Steuermodul einbauen. Es kann über einen Pneumatikschlauch direkt an praktisch alle Elemente angeschlossen werden, z. B. an den Lufttank, aber auch über ein T-Stück an einen Leitungsabschnitt. Abbildung 10-12 zeigt zwei Beispiele für die Platzierung des Manometers.

Brauchbar ist das Manometer nur in Systemen mit einem Lufttank und einem Motorkompressor. Dort zeigt es an, wie viel Luft noch im Tank gespeichert ist oder wie viel Druck der Kompressor aufbaut. In Pneumatikanlagen mit manuellen Pumpen und ohne Lufttank wird der Druck nicht für genügend lange Zeit aufgebaut, um das Manometer sinnvoll einzusetzen.

## Das pneumatische System modifizieren

Das Pneumatiksystem eignet sich gut für Experimente. Im Folgenden findest du einige gebräuchliche Arten zu seiner Veränderung.

### Nicht von LEGO stammende Schläuche

Die Original-Pneumatikschläuche von LEGO können ganz einfach durch eigene ersetzt werden, sofern sie elastisch und 4 mm dick sind (Letzteres ist erforderlich, um sie durch Technic-Löcher zu führen) und innere Kanäle von ausreichender Breite aufweisen. Dafür eignen sich einige industriell gefertigte Schläuche, z. B. die Treibstoffleitungen für funkferngesteuerte Modelle. Auch die Schläuche eines medizinischen Tropfs – also IV-Leitungen – können verwendet werden, allerdings werden sie schnell klebrig und sammeln viel Staub an.

### Nicht von LEGO stammende Lufttanks

Die LEGO-Lufttanks sind zwar sehr nützlich, lassen sich aber auch durch praktisch jeden luftdichten Behälter ersetzen. Plastikflaschen, Plastikbeutel und sogar Luftballons funktionieren sehr gut, sofern du sie luftdicht mit der Pneumatikanlage verbindest.

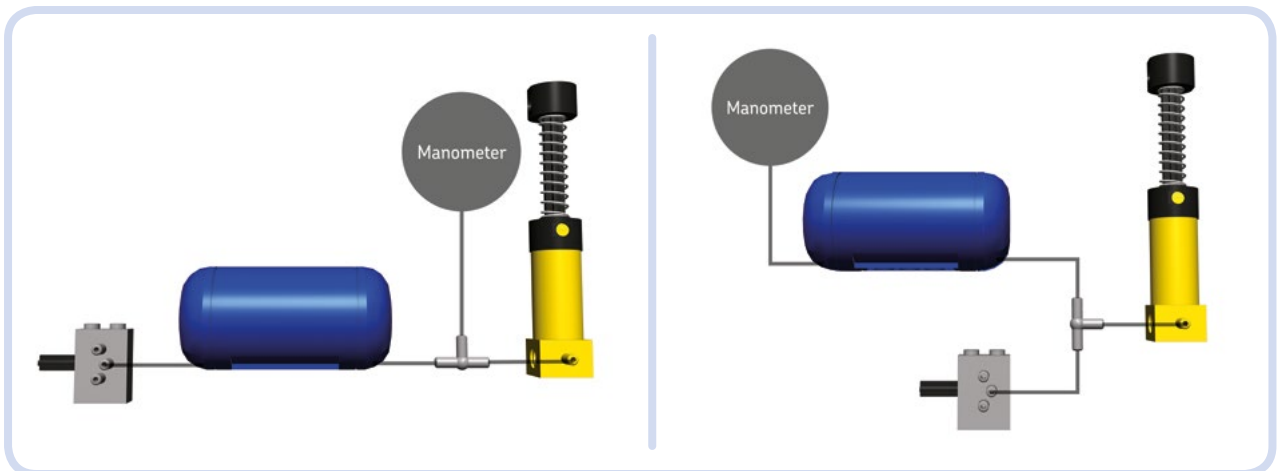


Abbildung 10-12: Diese beiden Verlaufspläne zeigen eine Pneumatik mit Lufttank und Manometer. Sowohl der Tank als auch das Manometer funktionieren in beiden Schaltvarianten auf genau dieselbe Weise.

## Federn entfernen (Herstellen eines Motorkompressors)

Da die großen Pneumatikpumpen weit leistungsfähiger sind als die kleinen, können sie vorteilhaft in Motorkompressoren eingesetzt werden. Das einzige Problem dabei ist die Feder der großen Pumpe, die dem Motor Widerstand entgegensetzt und dadurch den Mechanismus verlangsamt. Um dieses Problem zu lösen, musst du die Feder entfernen. Bei der alten Pumpe kannst du sie abziehen, bei der neuen musst du sie abschneiden (da die Kontaktfläche im Weg ist).

## Pneumatische Federung

Bei schweren Modellen kannst du große Pneumatikzylinder anstelle von Stoßdämpfern verwenden, um eine pneumatische Federung zu konstruieren. Je nach dem Luftdruck, der in ihnen herrscht, neigen die Zylinder dazu, sich unter Last zusammenzuziehen und bei verringerter oder fehlender Last wieder in die Neutralstellung auszufahren.

Vorteile der pneumatischen Federung sind ihre Robustheit und die Möglichkeit, den Bodenabstand einfach durch die Änderung des Luftdrucks einzustellen. Leider weist sie auch einige Nachteile auf. Erstens ist die Leistung schlechter als bei herkömmlichen Stoßdämpfern, zweitens eignet sie sich am besten für schwere Modelle und drittens muss die Pneumatikanlage aufgrund von Mikrolecks von Zeit zu Zeit aufgefüllt werden.

## Die Pneumatik in eine Hydraulik umwandeln

In der realen Technik sind Pneumatiken weniger weit verbreitet als Hydrauliken. Mit Flüssigkeiten gefüllte Hydraulikanlagen werden für viele Maschinen verwendet, die schwere Lasten handhaben müssen, vor allem für Baumaschinen wie Bagger, Kräne, Frontlader, Radlader, Gabelstapler, Muldenkipper usw.

Wenn deine Modelle schwere Lasten handhaben müssen, kannst du die Pneumatik in eine Hydraulik umwandeln, indem du die Luft durch eine Flüssigkeit ersetzt. Dabei musst du jedoch äußerst vorsichtig vorgehen.

Dabei läufst du allerdings Gefahr, die Zylinder zu beschädigen, die über Metallkolben verfügen. Je nachdem, welche Flüssigkeit du einsetzt, können diese Kolben rosten. Außerdem sind sie mit einem Schmiermittel bedeckt, das mit der gewählten Flüssigkeit reagieren oder von ihr gewaschen werden kann. Selbst wenn du eine »sichere« Flüssigkeit verwendest, hast du noch das Problem, die Zylinder nach dem Gebrauch wieder zu trocknen, was sehr schwierig ist, da sie fast vollständig geschlossen sind.

In der folgenden Aufstellung findest du einige Tipps zur Verwendung von Flüssigkeiten in einer LEGO-Pneumatik. Dies stellt jedoch keine Empfehlung dar, das System mit einer Flüssigkeit zu füllen, denn dabei kannst du Bauteile beschädigen. Wenn du dieses Experiment wagst, so geschieht dies auf eigene Gefahr. Es kann zu einer ziemlichen Schweinerei führen, wenn etwas schiefgeht!

- \* Als Flüssigkeit wählst du am besten ein Mineralöl – eine nicht korrosive, chemisch neutrale, geruchlose Flüssigkeit, die auch bei Hautkontakt nicht gesundheitsgefährdend ist. Mineralöl ist um 20% dünner als Wasser, billig und in den meisten Drogerien erhältlich.
- \* Du solltest nur das neue oder das V2-Pneumatiksystem von LEGO in eine Hydraulik umwandeln, da hierbei nur das Ventil einen Ablass darstellt. Flüssigkeit kann nur dort austreten und nicht wie im alten System auch aus den Zylindern.
- \* Eine gleichmäßige Zufuhr von Flüssigkeit ist erforderlich. Die LEGO-Pumpen müssen komplett untergetaucht sein, um die Flüssigkeit befördern zu können.
- \* Die Zähigkeit der Flüssigkeit verbessert die Handhabung schwerer Lasten durch die Zylinder, allerdings musst du dafür auch mehr Kraft zum Pumpen aufwenden.
- \* Bei der Verwendung von Flüssigkeiten ist es sehr wichtig, dass die Dichtungen in der Pneumatikanlage intakt sind. Durch Lecks kann Luft in das System gelangen, was die Funktion der Anlage ganz außer Kraft setzt.
- \* Jegliche Lecks in einer mit Flüssigkeiten gefüllten Pneumatik haben auch Auswirkungen auf die Umgebung. Achte darauf, dass sich in deiner Konstruktion keine elektrischen Bauteile oder Metallelemente in der Nähe der Pneumatik befinden. Versuche das System so zu bauen, dass du leichten Zugang zu Schläuchen hast, sodass du sie schnell sperren oder hochheben kannst, falls sie von ihren Anschlüssen abspringen, um ein Austreten von Flüssigkeit zu verhindern.
- \* Verwende in einem mit Flüssigkeiten gefüllten System niemals ein Manometer, da es dadurch zerstört werden kann.
- \* Es ist sehr schwierig, das Innere von Pneumatikbauteilen zu trocknen, sofern du sie nicht auseinanderbaust. Es ist hilfreich, über einen längeren Zeitraum hinweg warme Luft durch die Elemente zu pumpen. Du kannst auch versuchen, sie eine Weile in einem Beutel mit rohem Reis aufzubewahren, da Reis Feuchtigkeit aufsaugt.