

Komplett
in Farbe!



Benedettelli

DAS LEGO[®]- MINDSTORMS[®]- EV3-LABOR

Bauen, programmieren und
experimentieren mit 5 tollen Robots

Papier
plus⁺
PDF.

Zu diesem Buch – sowie zu vielen weiteren dpunkt.büchern – können Sie auch das entsprechende E-Book im PDF-Format herunterladen. Werden Sie dazu einfach Mitglied bei dpunkt.plus⁺:

www.dpunkt.de/plus

DAS LEGO[®]- MINDSTORMS[®]-EV3- LABOR

**Bauen, programmieren und experimentieren
mit 5 tollen Robots**

Daniele Benedettelli

Übersetzung: G&U Language & Publishing Services GmbH, www.gundu.com
Satz: G&U Language & Publishing Services GmbH, www.gundu.com
Copy-Editing: Ursula Zimpfer
Lektorat: Dr. Michael Barabas
Herstellung: Frank Heidt
Umschlaggestaltung: Helmut Kraus, www.exclam.de
Druck und Bindung: M. P. Media-Print Informationstechnologie GmbH, 33100 Paderborn

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN:
Buch 978-3-86490-152-2
PDF 978-3-86491-472-0
ePub 978-3-86491-473-7

Deutsche Ausgabe der amerikanischen Auflage 2014
Translation copyright für die deutschsprachige Ausgabe © 2014 dpunkt.verlag GmbH
Wiebinger Weg 17
69123 Heidelberg

Copyright der amerikanischen Originalausgabe © 2014 by Daniele Benedettelli
Title of American original: The LEGO® MINDSTORMS® EV3 Laboratory
No Starch Press, Inc., San Francisco • www.nostarch.com
ISBN 978-1-59327-533-4

Die vorliegende Publikation ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte vorbehalten.
Die Zusammenstellung der Software wurde nach bestem Wissen und Gewissen vorgenommen.
Bitte berücksichtigen Sie die jeweiligen Copyright-Hinweise, die bei den Programmen enthalten sind.
Die Verwendung der Texte und Abbildungen, auch auszugsweise, ist ohne die schriftliche Zustimmung des Verlags urheberrechtswidrig
und daher strafbar. Dies gilt insbesondere für die Vervielfältigung, Übersetzung oder die Verwendung in elektronischen Systemen.
Es wird darauf hingewiesen, dass die im Buch verwendeten Soft- und Hardware- Bezeichnungen sowie Markennamen und
Produktbezeichnungen der jeweiligen Firmen im Allgemeinen warenzeichen-, marken- oder patentrechtlichem Schutz unterliegen.
LEGO, LEGO-Figuren und LEGO-Bausteine sind Warenzeichen der LEGO-Gruppe. Dieses Buch ist von der LEGO-Gruppe weder
unterstützt noch autorisiert worden.

Alle Angaben und Programme in diesem Buch wurden mit größter Sorgfalt kontrolliert. Weder Autor noch Verlag können jedoch
für Schäden haftbar gemacht werden, die im Zusammenhang mit der Verwendung dieses Buches stehen.

5 4 3 2 1 0

Im Andenken an Nari

Der Autor



Daniele Benedettelli ist ein italienischer Robotiker, der weltweit für seine Lego-Mindstorms-Kreationen wie Lego Rubik Utopia (2007), Cyclops (2011) und Legonardo (2013) bekannt ist. Er lässt sich lieber Danny nennen, vor allem, um nicht mit einem Mädchen namens Danielle verwechselt zu werden. (In Bahrain wurde ihm einmal eine Plakette für »die Vermittlung ihrer Erfahrungen und Kenntnisse in der Robotik« überreicht.)

1992 schied sein Modell »Kater Tom« im Lego-Wettbewerb eines Spielwarenladens seiner Heimatstadt schon frühzeitig aus, aber er gab trotzdem nicht auf. Er *spielte mit Begeisterung weiter*, bis er in die »dunkle Lego-Phase« eintrat – die Zeit im Leben eines erwachsenen Lego-Fans, in der die Interessen der Realität (in seinem Fall Mädchen) die Leidenschaft für die Plastikbausteine verdrängten. Zumindest bis 2001, als er auf Lego Mindstorms RCX stieß.

Seit 2006 arbeitet Benedettelli als MCP (Mindstorms Community Partner) mit der Lego-Gruppe zusammen, um Lego-Mindstorms-Produkte zu testen und zu entwickeln. 2012 wurde er als externer Programmierer für Lego Education angeworben. Unter zwölf Fachleuten wurde er ausgewählt, um Lego Mindstorms EV3 zu testen. Er konstruierte die EL3CTRIC GUITAR, eines der Bonusmodelle für die im Einzelhandel erhältliche Version 31313.

2012 gelang es ihm mit der Hilfe des openPICUS-Teams, den NXT2WIFI über Spenden zu finanzieren und auf den Markt zu bringen. Dabei handelt es sich um einen WLAN-Adapter für den NXT, mit dem

es möglich ist, Roboter über jedes browserfähige Gerät (Computer, Android-Smartphones, iPhones und iPads) zu steuern und Gruppen von vernetzten Robotern aufzubauen.

Zurzeit arbeitet er als Lehrer für Elektronische Systeme an einer High School und als freiberuflicher Lego-Designer für das Franchise-Unternehmen Bricks4Kidz. Er hat an vielen Lego-Veranstaltungen teilgenommen und wurde auch als Hauptredner und Workshop-Moderator zu Konferenzen in aller Welt eingeladen, die sich mit der Bildung im Bereich Informations- und Kommunikationstechniken beschäftigen. Sein YouTube-Kanal wird millionenfach aufgerufen, und seine Kreationen wurden überall auf der Welt in vielen Fernsehsendungen vorgestellt. Manchmal spielt Benedettelli auch Klavier und komponiert (vor allem die Begleitmusik zu seinen Videos). Er bastelt Origamifiguren und zeichnet Comics, wobei sich Letzteres bei diesem Buch als äußerst nützlich erwies. Darüber hinaus hat er bereits zwei Bücher verfasst: *Creating Cool LEGO MINDSTORMS NXT Robots* (Apress, 2008) und *LEGO MINDSTORMS NXT Thinking Robots* (No Starch Press, 2009). Mehr über ihn kannst du über folgende Links erfahren (in englischer Sprache):

<http://robotics.benedettelli.com/>

<http://music.benedettelli.com/>

<http://www.facebook.com/robotics.benedettelli/>

<http://twitter.com/DBenedettelli>

Der Fachgutachter

Claude Baumann hat 15 Jahre lang Lego-Mindstorms-Robotik für Fortgeschrittene als Nachmittagsbetreuung unterrichtet. Er war am Betatest der am Center for Engineering and Outreach (CEEO) der Tufts University (<http://ceeeo.tufts.edu/>) entwickelten ROBOLAB-Software beteiligt und hat ULTIMATE ROBOLAB erfunden, eine compilerübergreifende Umgebung, die die grafische Programmierung der Lego-RCX-Firmware ermöglichte. Damit hat er das weltweit einzige selbst reproduzierende Programm für Lego RCX entwickelt (manche nennen es auch einen Virus). Außerdem hat Claude auch als einer der

Entwickler im NXT-Module-Team des CEEO mitgearbeitet. Vor Kurzem war er als MCP (Mindstorms Community Partner) an der Entwicklung des neuen intelligenten EV3-Steins beteiligt. Er war Gutachter für viele Robotikprojekte an High Schools und ist Autor von *Eureka! Problem Solving with LEGO Robotics* (NTS Press, 2013) sowie von mehreren Artikeln und Präsentationen auf Konferenzen. Außerdem ist er Leiter eines Verbundes mehrerer Internate in Luxemburg. Er ist verheiratet und hat drei Kinder und drei Enkelkinder.

Die Comiczeichner



Arte Invisibile oder »unsichtbare Kunst« (<http://www.arteinvisibile.com/>, <http://www.facebook.com/AssociazioneArteInvisibile/>) wurde 2007 gegründet und ist ein nicht kommerzieller Verband junger Künstler in der Toskana. Er hat über 100 Mitglieder.

Arte Invisibile organisiert Kurse für Comicgestaltung, Illustration, digitale Kunst, Drehbuchschreiben und Animation. Das Ziel besteht

darin, junge Menschen die Kunst und damit verwandte Berufen näherzubringen. Im Laufe der Jahre hat der Verband verschiedene Publikationen herausgegeben sowie Ausstellungen und Workshops mit weltberühmten Künstlern organisiert. Außerdem unterhält er eine gut ausgestattete Comicbibliothek mit vielen seltenen Comicbüchern.

Danksagungen

Ich hatte ganz vergessen, wie schwer es ist, ein Lego-Mindstorms-Buch zu schreiben – und jetzt obendrein noch eines mit einem Comic! Es gibt viele Menschen, denen ich dafür danken muss, dass sie dieses Projekt möglich gemacht haben. Als Erstes danke ich meiner Familie für ihre Unterstützung und Geduld während dieser Zeit: meinen in Sachen Lego völlig unerfahrenen **Eltern**, die die Bauanleitungen für die Roboter ausprobiert und mir dabei geholfen haben, sie glasklar zu gestalten; meinem **Bruder**, der mir ständig in den Ohren lag, mir doch einen vernünftigen Job zu suchen; meinen **Großeltern**, die entsetzt darüber waren, zu was sich Spielzeug entwickelt hat (vor allem meine **Großmutter**, die sich wie ein Ninja-Krieger von hinten an meinen Lego-Arbeitstisch heranschlich und mir zuflüsterte: »Was machst du da? Ist das Arbeit?«, wodurch meine Haare einen kleinen Tick grauer geworden sind). Nicht zu vergessen auch der unermüdlich lebenswürdige Haushund, der meinen Fußboden mit Fell und Sabber übersät und meine Lego-Roboter angebellt hat, als wären es Lebewesen.

Danke an das Team von No Starch Press, vor allem an **Bill** für den Glauben an dieses Projekt, für seine Kritiken und Vorschläge, und an **Riley** für ihre unermüdliche und freundliche Unterstützung.

Ein großes Dankeschön geht an **Claude Baumann**, einen renommierten Schulleiter, Lehrer und Autor, der die fachlichen Aspekte dieses Buches pünktlich und akribisch durchgesehen hat. Danke auch an die Gruppe **twelve monkeys**, deren stolzes Mitglied ich bin, für ihre Freundschaft und Anregung. Des Weiteren danke ich **John Hansen** für sein frühzeitig entwickeltes EV3-Screenshotprogramm und dem Team von Lego Mindstorms, vor allem **Lee** (dafür, dass ich als Programmierer für Lego Education arbeiten darf), **Steven** (für die Zustimmung zu meinen Projekten) sowie **Camilla, Flemming B., Henrik, Jesper, Lars Joe, Linda, Marie, Oliver, Pelle** und **Peter**.

Ein riesiges Dankeschön geht an alle Mitglieder der LDraw-Community, die Werkzeuge entwickelt haben, um qualitativ hochwertige Bauanleitungen zu erstellen, die aussehen wie von Lego selbst! Besonderer Dank gilt dabei dem Baumeister und Buchautor **Philippe Hurbain** (Philo), einem Köhner in der 3D-Modellierung von Lego-Elementen, und **Kevin Clague**, dem Entwickler von LPUB4.

Danken möchte ich meinem lieben Freund, dem Fotografen **Francesco Rossi** (<http://fr-ph.com/>), für das großartige Foto auf dem Umschlag dieses Buches. Er hat mich schon mit verrückten und wunderbaren Fotos meiner Spitzenmodelle wie Cyclops und Legonardo unterstützt. Die Mädchen wollen immer nicht glauben, dass ich derjenige auf den Fotos bin, und wollen *ihn* sofort kennenlernen! Wirklich wahr!

Danke an **Marco** und **Susanna**, die mir geholfen haben, meine ersten Skizzen in eine komplette Bildergeschichte umzusetzen, und an **Nicola** für seine Hilfe in letzter Minute. Besonderer Dank auch an Cristiano für die Durchsicht der deutschen Fassung des Comic-Abenteuers.

Und zum Schluss geht mein Dank noch an den nichtsahnenden **Eddie** für die Inspiration zu Dexter. Für die anderen Gestalten in diesem Comic gilt wie üblich: *Jegliche Ähnlichkeit mit lebenden oder verstorbenen Personen ist rein zufällig*. Bei der Herstellung dieses Buches wurden keine Azubis verletzt.

Übersicht

Einleitung	xix
Der Praktikant des EV3L-Forschers	1
Kapitel 1 Das Lego-Mindstorms-EV3-Set	5
Kapitel 2 Den ROV3R bauen	17
Kapitel 3 Programmierung	47
Kapitel 4 On-Brick-Programmierung für Fortgeschrittene	61
Kapitel 5 EV3-Programmierung	69
Kapitel 6 Experimente mit den Infrarotbauteilen des EV3-Sets	85
Kapitel 7 Keine Magie – nur Mathematik!	95
Kapitel 8 Lego-Rezepte	103
Kapitel 9 Die WATCHG00Z3 bauen	131
Kapitel 10 Die WATCHG00Z3 programmieren	177
Kapitel 11 Das SUP3RCAR bauen	191
Kapitel 12 Das SUP3RCAR programmieren	231
Kapitel 13 Den SENTIN3L bauen	249
Kapitel 14 Den SENTIN3L programmieren	295
Kapitel 15 Den T-R3X bauen	309
Kapitel 16 Den T-R3X programmieren	363
Anhang A Inhalt des EV3-Sets 31313	381
Anhang B Unterschiede zwischen der Education- und der normalen Einzelhandelsausgabe von EV3	389
Index	403

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	xix
Spielen ohne Computer	xix
Für wen ist dieses Buch gedacht?	xix
Was du neben diesem Buch noch brauchst	xix
Die EV3-Software	xix
Der Aufbau dieses Buches	xx
Die Begleitwebsite	xx
Und los geht's!	xx
Der Praktikant des EV3L-Forschers	1
1	
Das Lego-Mindstorms-EV3-Set	5
Bauen ohne Noppen	5
Bauen mit und ohne Noppen: konstruktive Unterschiede	5
Die Bezeichnungen der Teile	6
Balken	6
Verbinder	8
<i>Kreuze und Löcher</i>	9
Räder, Reifen und Raupenkette	12
Dekorative Elemente	13
Sonderteile	13
Elektronische Bauteile	13
Die Unterschiede zwischen der Education- und der Einzelhandelsversion von EV3	14
Zusammenfassung	14
2	
Den ROV3R bauen	17
Das Grundmodul	19
ROV3R mit Rädern	23
Stoßstange mit Berührungssensor	25
ROV3R mit Stoßstange und Berührungssensor	27
Spurfolgemodul	28
ROV3R mit Spurfolgemodul	28
Vorderer IR-Sensor	30
ROV3R mit vorderem IR-Sensor	31
Wandfolgemodul	32
ROV3R mit Wandfolgemodul	32
Alternative: ROV3R mit Wand- und Spurfolgemodul	33
Fußbodenreiniger	34

ROV3R mit Fußbodenreiniger	36
Alternative 1: ROV3R mit Fußbodenreiniger und Berührungssensor-Stoßstange	38
Alternative 2: ROV3R mit Wandfolgemodul und Fußbodenreiniger	39
ROV3R mit Raupenkettens	40
Geheimprojekt: Greifermodul	44
Zusammenfassung	44
3	
Programmierung	47
Die Grundbausteine von Programmen	47
Reihen	48
Verzweigungen	48
Schleifen	48
On-Brick-Programmierung	48
Dein erstes Stein-Programm	49
<i>Schnelleinführung in die On-Brick-Programmierung</i>	50
Die Blockpalette	53
Aktionsblöcke	54
Warteblöcke	56
<i>Experiment 3-1</i>	58
Der Schleifenblock	58
<i>Experiment 3-2</i>	59
Zusammenfassung	59
4	
On-Brick-Programmierung für Fortgeschrittene	61
ROV3R mit Berührungssensor-Stoßstange	61
<i>Experiment 4-1</i>	62
So fährt der ROV3R geometrische Pfade ab	62
So folgt der ROV3R vorgezeichneten Linien	62
Das Spurfolgeprogramm erstellen	63
Fließendere Bewegungen	63
<i>Experiment 4-2</i>	63
So fährt der ROV3R immer an der Wand entlang	64
Fließendere Bewegungen	64
<i>Experiment 4-3</i>	65
Zusammenfassung	65
5	
EV3-Programmierung	69
Die EV3-Software einrichten	69
Überblick über die EV3-Software	69
Die Lobby	69
Die Programmieroberfläche	70
<i>Programme kompilieren</i>	71
Die Hardwareseite	72
Das Werkzeugmenü	72

Die Programmierpaletten	73
Projekteigenschaften	75
Den EV3-Stein an den Computer anschließen	75
Ein Stein-Programm importieren	76
Das importierte Stein-Programm untersuchen	76
Das importierte Stein-Programm bearbeiten	77
<i>Blöcke loswerden</i>	77
<i>Hintergrundwissen: Den Parameter »Gradanzahl« zur genauen Bestimmung der Fahrtstrecke berechnen</i>	78
Mehr Genauigkeit!	78
Experimente mit Aktionsblöcken	79
<i>Hintergrundwissen: Den Parameter »Gradanzahl« zum genaueren Lenken berechnen</i>	79
<i>Experiment 5-1</i>	82
Den Programmablauf steuern	82
Der Schalterblock	82
<i>Experiment 5-2</i>	83
Zusammenfassung	83
6	
Experimente mit den Infrarotbauteilen des EV3-Sets	85
Die IR-Fernsteuerung	85
Die IR-Fernsteuerung als Fernbedienung verwenden	86
Sensorblöcke und Datenleitungen verwenden	87
<i>Datenleitungen entwirren</i>	87
<i>Experiment 6-1</i>	88
Fehlersuche mit der EV3-Software	88
Datenanzeige mit dem Textblock	88
Was sind Datentypen?	89
<i>Hintergrundwissen: Dezimalzahlen</i>	90
Datentypumwandlung	90
So folgt der ROV3R der IR-Fernsteuerung	91
<i>Hintergrundwissen: Ortung für Roboter</i>	92
<i>Experiment 6-2</i>	92
Die Grundoperationen des Matheblocks nutzen	93
<i>Experiment 6-3</i>	93
Zusammenfassung	93
7	
Keine Magie – nur Mathematik!	95
Mit Messrauschen umgehen	95
Der Matheblock im erweiterten Modus	96
Der Rundungsblock	96
<i>Hintergrundwissen: Mit Fehlern aus dem Matheblock umgehen</i>	97
Der Vergleichsblock	98
Numerische in logische Werte umwandeln	98
Vergleiche in anderen Blöcken	98
Der Konstantenblock	98

Das Wandfolgeprogramm verbessern	98
<i>Hintergrundwissen: Rückkopplungsregler</i>	100
<i>Experiment 7-1</i>	100
<i>Experiment 7-2</i>	100
<i>Experiment 7-3</i>	100
Zusammenfassung	100

8

Lego-Rezepte	103
Die geheimen Eigenschaften von Winkelbalken	103
<i>Hintergrundwissen: Ein LDraw-Rätsel ist gelöst!</i>	104
Dreiecke versus Vierecke	104
Balken verlängern	107
Klammern	108
Kreuzverbinder	110
Noch ein Wort zu Zahnrädern	111
Eine gute Verzahnung erreichen	111
Zahnräder montieren	113
Zahnräder kombinieren	114
Rechtwinklige Verzahnung	115
Zahnradgetriebe	118
Schneckengetriebe	119
Bewegungen umwandeln	121
Bauideen für Motoren	123
Mittlerer Motor mit vorderem Ausgang (1)	123
Mittlerer Motor mit vorderem Ausgang (2)	124
Mittlerer Motor mit einzeltem seitlichem Ausgang	125
Mittlerer Motor mit doppeltem seitlichem Ausgang	125
Mittlerer Motor mit einfach untersetztem seitlichem Ausgang	126
Mittlerer Motor mit Getriebe	126
Mittlerer Motor mit mehreren Ausgängen	127
Großer Motor mit horizontalem Ausgang	128
Großer Motor mit Getrieben	128
Zusammenfassung	128

9

Die WATCHGOOZ3 bauen	131
Wie bewegt sich die WATCHGOOZ3?	131
Rechtes Bein	132
Linkes Bein	138
Rumpf	145
Linker Fuß	147
Rechter Fuß	150
Rumpf	152
Hintere Halterung	155
Vordere Halterung	160
Rumpf	161
Hals und Kopf	167
Rumpf	171

10		
Die WATCHGOOZ3 programmieren		177
Das Stein-Programm für die WATCHGOOZ3		177
Das Programm		177
Die Funktionsweise		177
Ausführen und Fehler beheben		178
Das Programm in die EV3-Software importieren und bearbeiten		178
Eine Sicherungskopie anlegen		179
Das Programm abwandeln		179
Eigene Blöcke erstellen		180
Eigene Blöcke mit Ein- und Ausgängen erstellen		181
Ein- und Ausgänge automatisch zu Eigenen Blöcken hinzufügen lassen		183
Zusätzliche Konfiguration eines Eigenen Blocks		184
Ein erweitertes Programm erstellen		184
Der Eigene Block ResetBody		184
Einen erweiterten Eigenen Block für die Fortbewegung erstellen		186
Das endgültige Programm für die WATCHGOOZ3		187
Der Logikblock		187
<i>Hintergrundwissen: Drehzahlregelung für Motoren</i>		188
<i>Experiment 10-1</i>		188
<i>Experiment 10-2</i>		188
Der Zeitgeberblock		188
Zusammenfassung		188
11		
Das SUP3RCAR bauen		191
Karosserie		192
Motorhaube		196
Karosserie		199
Autodach		213
Karosserie		214
Lenkung		216
Karosserie		218
R3MOTE		222
Zusammenfassung		227
12		
Das SUP3RCAR programmieren		231
Elektronische und mechanische Differenziale		231
<i>Hintergrundwissen: Drehzahlen für ein elektronisches Differenzial berechnen</i>		232
Variablen		232
Arrays		233
Numerische und logische Arrays im Variablenblock		233
Der Arrayblock		233
Der Schalterblock mit mehreren Fällen		234
Reihen parallel ausführen (Multitasking)		234

Eigene Blöcke erstellen	235
Der Eigene Block ResetSteer	235
Der Eigene Block Steer	236
Der Eigene Block Drive	236
Der Eigene Block ReadRemote2	237
Das Auto für selbstständiges Fahren programmieren	239
Das Auto für den Einsatz der Fernsteuerung programmieren	240
Den Block ReadRemote mithilfe von Arrays aufräumen	240
Das Auto für die Verfolgung der Fernsteuerung programmieren	242
Der Eigene Block Sign	242
Der Eigene Block Saturation	242
Der Eigene Block ReadBeacon	242
<i>Experiment 12-1</i>	244
Der Block Bereich	244
Das Programm FollowBeacon	244
Das SUP3RCAR mit einer Sirene ausstatten	245
<i>Experiment 12-2</i>	246
Der Block zur Schleifenunterbrechung	246
Der Block zum Beenden des Programms	246
Zusammenfassung	246

13

Den SENTIN3L bauen	249
Rumpf	250
Rechtes Bein	254
Rumpf	257
Linkes Bein	257
Rumpf	260
Brust	264
Rumpf	269
Linker Arm	273
Rechter Arm	274
Rumpf	276
Rückenschild	279
Mittelteil des Rückenschilds	281
Rückenschild (Forts.)	282
Kopf	283
Rückenschild (Abschluss)	285
Rumpf	288
COLOR CUB3	290
Zusammenfassung	292

14

Den SENTIN3L programmieren	295
Der Dateizugriffsblock	295
Dateien erstellen, löschen und Daten schreiben	295
Daten aus einer Datei lesen	296
Das Dateieinde erkennen	296

Der Zufallsblock	296
Eigene Blöcke erstellen	296
Der Eigene Block ResetLegs	296
<i>Hintergrundwissen: Der Zusammenhang zwischen »Stromstärke« und Drehzahl</i>	297
Der Eigene Block WalkFWD	298
Der Eigene Block Laser	298
Der Eigene Block Turn	299
Der Eigene Block PowerDownFX	299
Der Eigene Block WaitButton	300
Der Eigene Block SayColor	300
Der Eigene Block ExeCode	300
Der Eigene Block MakeProgram	300
Der Eigene Block RunProgram	301
Der Eigene Block MakePrgFile	301
Der Eigene Block ParseFile	303
Der Eigene Block RunPrgFile	303
Den SENTIN3L für Patrouillengänge programmieren	304
Farbprogrammierung des SENTIN3Ls zur Laufzeit	304
<i>Experiment 14-2</i>	305
<i>Experiment 14-1</i>	305
<i>Experiment 14-3</i>	306
<i>Experiment 14-4</i>	306
Dauerhafte Farbprogramme erstellen	306
Zusammenfassung	306

15

Den T-R3X bauen	309
Rumpf	310
Beingerüst	313
Rumpf	315
Linkes Bein	318
Rechtes Bein	323
Rumpf	328
Der EV3-Stein	333
Rumpf	334
Kopf und Vorderarme	345
Rumpf	355
Zusammenfassung	357

16

Den T-R3X programmieren	363
Die Eigenen Blöcke für das Programm Wander erstellen	363
Der Eigene Block Reset	363
Die Eigenen Blöcke MoveAbsolute und MoveAbsolute2	363
Der Eigene Block Step	364
Der Eigene Block Roar	364
Der Eigene Block Chew	364
Der Eigene Block Look	365

Der Eigene Block Right	365
Der Eigene Block Left	366
Der Eigene Block TurnUntil	366
Den T-R3X für die Fortbewegung programmieren	367
Das Verhalten des T-R3X gestalten	367
<i>Hintergrundwissen: Verhaltensmodellierung mithilfe von Zustandsautomaten</i>	368
Einen Zustandsautomaten einrichten	369
Allgemeiner Aufbau	369
Anfangszustand	370
Die Zustandsvariable	370
Zustandsübergänge	370
Sensorereignisse	370
Zeitgeberereignisse	370
Mit dem Zeitgeber gefilterte Ereignisse	371
<i>Hintergrundwissen: Komplizierte logische Operationen mit dem Matheblock berechnen</i>	371
Aktionen	373
Die Eigenen Blöcke für das endgültige Programm erstellen	373
Der Eigene Block Turn	373
Der Eigene Block ReadBeacon	373
<i>Hintergrundwissen: Die Gesetze von De Morgan</i>	373
Der Eigene Block INIT	374
Der Eigene Block IDLE	374
Der Eigene Block HUNGRY	374
Der Eigene Block SEEK	376
Der Eigene Block CHASE	376
Das Verhalten des T-R3X programmieren	377
<i>Zustandsübergänge nach Priorität ordnen</i>	377
Zusammenfassung	379
<i>Experiment 16-1</i>	379
<i>Experiment 16-2</i>	379
<i>Experiment 16-3</i>	379
<i>Experiment 16-4</i>	379

A	
Inhalt des EV3-Sets 31313	381

B	
Unterschiede zwischen der Education- und der normalen Einzelhandelsausgabe von EV3	389
Elektronische Geräte	389
Die EV3-Software	389
Vom Einzelhandelsset zum Education-Grundkasten	389
Vom Education-Grundkasten zum normalen Einzelhandelsset	394
Vom Education-Erweiterungsset zum normalen Einzelhandelsset	398

Index	403
--------------------	------------

Einleitung

Die Idee zu diesem Buch kam mir 2012 in Saudi-Arabien. Zu dieser Zeit half ich der Lego-Gruppe dabei, das neue Lego Mindstorms EV3 zu entwickeln und zu testen. Wegen eines Sandsturms war ich in meinem Hotel gefangen, und während ich auf besseres Wetter wartete, hörte ich mir Paul Dukas' symphonische Vertonung von Goethes Ballade *Der Zauberlehrling* an. Das inspirierte mich zu der Geschichte eines Kindes, das die Gelegenheit bekommt, als Gehilfe eines Wissenschaftlers zu arbeiten. Diese Geschichte sollte den Hintergrund meines nächsten Buches über Lego Mindstorms bilden.

Spielen ohne Computer

Um alle Möglichkeiten des EV3-Sets nutzen zu können, brauchst du einen Computer mit schnellem Internetanschluss. Anders als die vorherigen Versionen ist die EV3-Software nur als Download erhältlich. Es wird auch keine gedruckte Bedienungsanleitung mitgeliefert, sondern nur ein Heftchen mit einer angedeuteten Bauanleitung für den einfachsten offiziellen Roboter, den TRACK3R, und einigen Hinweisen zur Programmierung direkt auf dem EV3-Stein.

Dank dieser neuen On-Brick-Programmierung kannst du aber auch ohne Computer mit den in diesem Buch vorgestellten Robotern herumspielen. Dies ist eine zwar eingeschränkte, aber doch brauchbare Möglichkeit, um Roboter direkt über das Menü auf dem EV3-Stein zu programmieren. In den Kapiteln 1 bis 4 und 8 bis 10 lernst du verschiedene Möglichkeiten kennen, um auch ohne Computer viel Spaß mit deinen Robotern zu haben.

Für wen ist dieses Buch gedacht?

Dieses Buch ist für alle gedacht, die sich für Roboter interessieren, gleich welchen Alters. Es zeigt dir, wie du Roboter mit der Einzelhandelsausgabe von Lego Mindstorms EV3 (Bestellnr. 31313) baust und programmierst.

Neben den spezifischen Bauanleitungen und Programmieranweisungen für die Roboter lernst du auch allgemeine Lego-Bautechniken sowie grundlegende und erweiterte Programmierprinzipien kennen. Selbst Experten und erfahrene Roboterkonstrukteure finden überall in diesem Buch Abschnitte mit Hintergrundwissen, die die einzelnen Themen noch vertiefen.

Was du neben diesem Buch noch brauchst

Um dieses Buch richtig nutzen zu können, brauchst du Lego Mindstorms EV3, und zwar die normale Version mit der Bestellnummer 31313. Außerdem benötigst du einen Computer mit Internetanschluss, um die EV3-Programmiersoftware herunterzuladen und zu installieren. Sie enthält auch die Anleitungen, um die fünf offiziellen Modelle dieses Sets zu bauen und zu programmieren. Lehrer und Schüler, die den Education-Grundkasten 45544 von Lego Mindstorms verwenden, finden in Anhang B eine Liste aller zusätzlichen Lego-Elemente, die sie brauchen, um ihren Satz auf den Umfang der Einzelhandelsausgabe 31313 zu erweitern.

In dem Set findest du auch ein USB-Kabel, mit dem du den EV3-Stein an deinen Computer anschließen kannst. Für eine Verbindung über Bluetooth braucht dein Computer einen eingebauten oder externen Bluetooth-Dongle. Willst du den EV3-Stein über WLAN anschließen, musst du dir noch einen USB-WLAN-Dongle beschaffen. Der einzige für den EV3-Stein geeignete Dongle ist zurzeit der Netgear WNA1100.

Die EV3-Software

Die EV3-Software wurde von National Instruments entwickelt, dem Unternehmen, das auch die Entwicklungsumgebung LabView geschrieben hat. Die EV3-Sprache basiert auf der grafischen Datenfluss-Programmiersprache G. National Instruments hat auch

die Programmiersprache NXT-G entwickelt, die bei NXT zum Einsatz kommt, der vorherigen Generation von Lego Mindstorms.

Wenn du NXT kennst und schon mit NXT-G programmiert hast, wirst du die Programmierung in EV3 als viel klarer empfinden: Jetzt zeigen alle Blöcke sämtliche Einstellungen auf einen Blick, sodass du einen Block nicht erst auszuwählen brauchst, um dir seinen Konfigurationsbereich anzusehen. In der Software kannst du deine Programme vergrößert darstellen und den Bildausschnitt ändern, um besser die Übersicht zu bewahren. Außerdem bietet sie zusätzliche Programmfunktionen.

Der Aufbau dieses Buches

Dieses Buch ist sowohl ein Handbuch als auch ein Arbeitsbuch. Im Verlauf der Geschichte in dem Comic werden neue Prinzipien und Vorgehensweisen eingeführt. (Schau dir die Comics genau an, denn sie enthalten einige versteckte Hinweise auf Bonusmaterial, das du von der Begleitwebsite herunterladen kannst, darunter die menschenfressende Pflanze AUDR3Y, den L3AVE-ME-ALONE-Kasten usw.). Die Kästen mit dem Titel »Hintergrundwissen« erklären schwierigere Themen etwas ausführlicher. Wenn du schon ein Experte bist, kannst du die einführenden Kapitel überspringen und gleich mit den Kapiteln 9 bis 16 loslegen, in denen du erfährst, wie du die vier anspruchsvolleren Roboter baust und programmierst. In den Kapiteln findest du auch Anregungen für Experimente, in denen du deine neu erworbenen Kenntnisse anwenden und vertiefen kannst. Die einzelnen Kapitel haben folgenden Inhalt:

- * Kapitel 1: Inhalt des Sets 31313, Bezeichnungen für Lego-Technic-Elemente
- * Kapitel 2 bis 4: Bau des ROV3Rs, eines Radroboters, der sich schnell zusammensetzen und ohne Computer programmieren lässt
- * Kapitel 5 bis 7: Einführung in die EV3-Programmierung auf einem Computer
- * Kapitel 8: Lego-Bautechniken
- * Kapitel 9 und 10: Bau und Programmierung der WATCHGOOZ3, eines Roboters auf Beinen, den du mit und ohne Computer programmieren kannst
- * Kapitel 11 und 12: Bau und Programmierung des SUP3RCARs, eines lenkbaren Automodells
- * Kapitel 13 und 14: Bau und Programmierung des SENTIN3Ls, eines Sicherheitsroboters auf Beinen
- * Kapitel 15 und 16: Bau und Programmierung des T-R3X, eines furchterregenden Dinosauriers auf Beinen

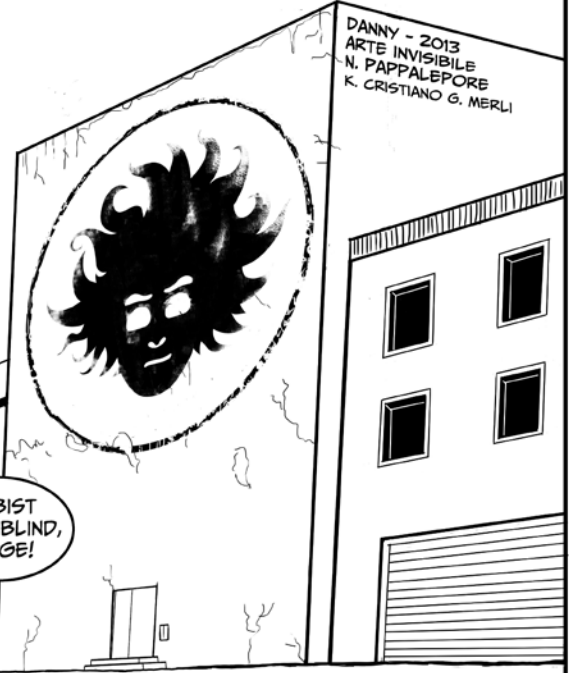
Die Begleitwebsite

Auf der Begleitwebsite <http://EV3L.com/> (in englischer Sprache) findest du EV3-Projekte für Roboter, Hinweise zu Fehlern im Buch, zusätzliche Tipps und Tricks sowie Bonusmaterial.

Und los geht's!

Willkommen an Bord! Begleite Dexter und Danny auf ihren Abenteuern und werde selbst zum Gehilfen eines EV3L-Wissenschaftlers!

Der Praktikant des EV3L-Forschers



> Target acquired!
 > Facial recognition init...
 > Detecting features... 3%

289904354
 490459434 0543
 4059493823
 984325482892
 3218843982
 2309495498
 330498434
 3004593
 300459
 2982

WO IST DENN DIE KLINGEL?

I challenge anyone to read what's written here

HALT!

?!

ZUTRITT GEWÄHRT!
 KOMM HEREIN!

VRRRR

IDENTIFIZIERUNG: DEXTER ZIFU, ZWEITES KIND VON LI ZIFU, DEM EHEMALIGEN EIGENTÜMER VON ZIFU INDUSTRIES, GELDGEBER DES EVOLUTION-3-LABS...

ICH WEISS, WER ICH BIN! WAS IST MIT DIR?

PROTOTYP BDL104, SEMIHUMANOIDES MODELL, ANZEIGENAME: CYCLOPS MARK I.

FOLGE MIR!

HM ... NICHT SEHR FREUNDLICH!

WOHIN GEHEN WIR?

WAS WILLST DU IM LABOR?

MEIN VATER SAGT, DASS ICH BEI MR. DANIEL EIN PRAKTIKUM MACHEN DARF.

0x0000A1AB

WIR SIND AUF DEM WEG ZU IHM!

OKAY...

01X2



01X3



01X4

1

Das Lego-Mindstorms-EV3-Set

Das EV3-Set 31313 von Lego Mindstorms enthält verschiedene Lego-Elemente, ein gedrucktes Handbuch (mit einer Anleitung für den Bau des offiziellen Robotermodells TRACK3R und einigen Hinweisen zur Verwendung des intelligenten EV3-Steins), ein USB/miniUSB-Kabel für den Anschluss des EV3-Steins an den Computer und einen Testbogen (einfach die Banderole um den Kasten entrollen) – aber keine Software! Wo ist die Software? Du kannst sie im Download-Bereich der offiziellen Website zu Lego Mindstorms EV3 (<http://LEGO.com/mindstorms/>) herunterladen. Bei den Lego-Technic-Elementen in dem Kasten handelt es sich um Balken, Pins, Zahnräder und Räder sowie um elektronische Bauteile wie Motoren, Sensoren, Kabel und den intelligenten EV3-Stein.

Bauen ohne Noppen

Wie du vielleicht schon weißt, gibt es im EV3-Kasten keine klassischen Lego-Steine. Die Balken haben auch keine Noppen. Wie also kannst du sie verbinden?

Seit dem Jahr 2000 sind Lego-Technic-Bausätze hauptsächlich aus »noppellosen« Teilen konstruiert. Die guten, alten scharfkantigen Technic-Steine mit Noppen wurden nach und nach durch abgerundete, noppeloze Technic-Balken ersetzt, die den Modellen einen schnittigeren Look geben (siehe Abbildung 1-1).

Ich weiß noch, wie ich zum ersten Mal mit den noppellosen Elementen versuchte zu bauen: Trotz jahrelanger Erfahrung mit »klassischen« Lego-Technic-Elementen hatte ich plötzlich das Gefühl, ich könnte selbst die einfachsten Dinge nicht mehr bauen. Es war frustrierend! Aber nachdem ich mir die offiziellen Lego-Technic-Modelle etwas genauer angesehen hatte, wurde ich nach und nach vertrauter mit den neuen Teilen. Natürlich musste ich erst eine ganz neue Art und Weise des Bauens lernen, aber das hat sich gelohnt. Bei der noppellosen Bautechnik kommen leichte, solide und elegante Modelle heraus. Wenn du erst einmal damit angefangen hast, wirst du dich fragen, wie du je ohne noppeloze Teile hast leben können!

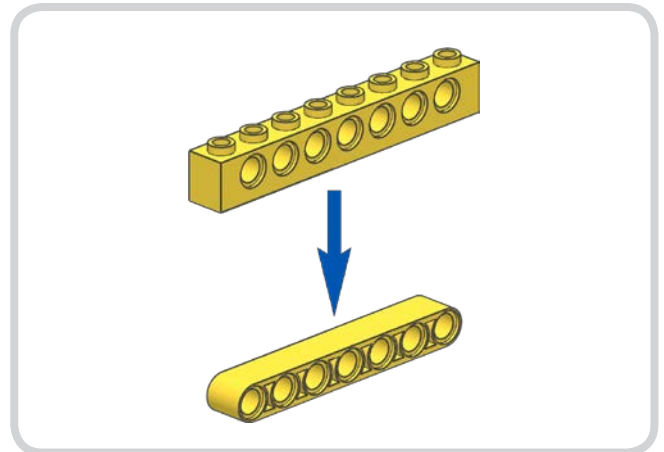


Abbildung 1-1: Ein klassischer 8L-Technic-Stein im Vergleich zu einem noppellosen 7L-Balken. Mit noppellosen Teilen kannst du meistens nicht so einfach nach Gefühl bauen wie mit herkömmlichen Lego-Steinen und -Platten, die du nur von unten nach oben aufeinandersteckst. Tatsächlich erfordert das noppeloze Bauen ein dreidimensionales Vorstellungsvermögen von innen nach außen.

Bauen mit und ohne Noppen: konstruktive Unterschiede

Technic-Steine haben eine gerade Anzahl von Noppen und eine ungerade Anzahl von Löchern (ein Zwei-Noppen-Stein hat ein Loch, ein Sechs-Noppen-Stein fünf Löcher usw.). Als Längenangabe dient die Anzahl der Noppen. Technic-Balken dagegen sind die abgespeckten, noppellosen Gegenstücke zu diesen Steinen. Als Längenangabe kannst du die Anzahl der Löcher verwenden, wie es in Abbildung 1-1 gemacht wurde. Ähnlich wie die Noppen von Lego-Steinen dienen Technic-Pins als »Leim«, der deine Lego-Modelle zusammenhält (siehe Abbildung 1-2).

Dank der abgerundeten Enden der Technic-Balken kannst du Strukturen und Mechanismen bauen, die viel kompakter und leichter sind als diejenigen, die sich mit herkömmlichen Lego-Steinen konstruieren lassen. Wenn du zwei Noppensteine nebeneinander drehbar auf Zapfen lagern willst, musst du mindestens zwei Löcher zwischen ihnen frei lassen (siehe Abbildung 1-3). Bei noppellosen Balken dagegen können die Zapfen unmittelbar nebeneinanderliegen.

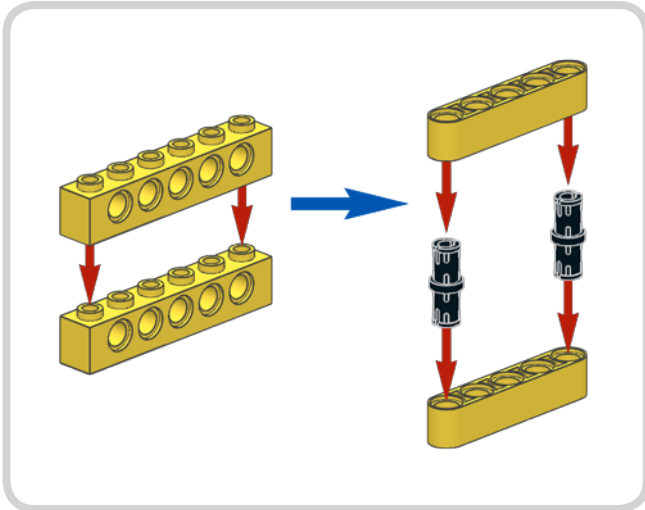


Abbildung 1-2: Was die Noppen für die Steine, sind die Pins für die noppenlosen Balken: der »Leim«, der sie zusammenhält.

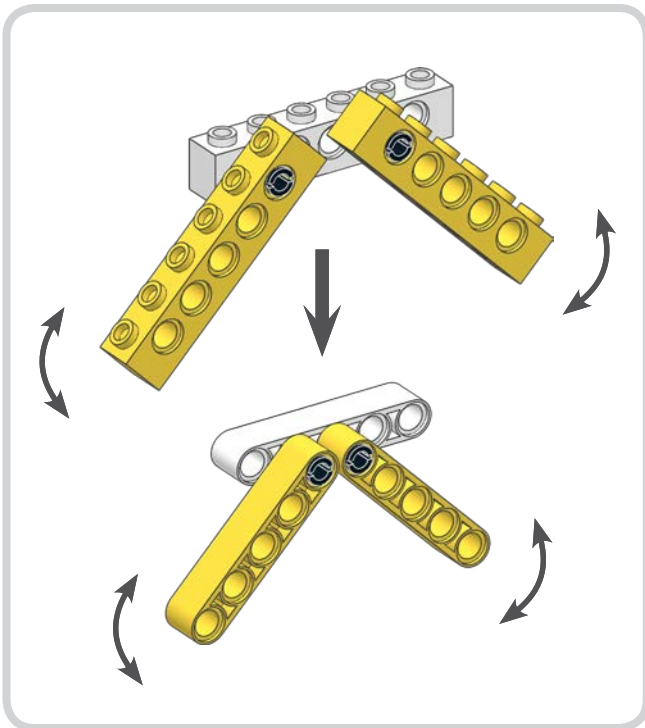


Abbildung 1-3: Technic-Balken nehmen weniger Platz ein als Steine, sodass du kompaktere Strukturen bauen kannst.

Andererseits lassen sich mit Standardsteinen und -platten stabilere und festere Strukturen bauen. Je nachdem, was du konstruieren willst, kannst du Elemente mit und ohne Noppen verwenden oder beide Bautechniken kombinieren.

Die Bezeichnungen der Teile

Nehmen wir an, du möchtest einen Lego-Roboter bauen, dir fehlt dazu aber ein bestimmtes Teil. Du möchtest mich gern fragen, ob ich dieses Element habe, aber du kannst deine Bitte nur sehr ungenau formulieren: »Danny, könntest du mir wohl so ein Dingsda geben ... ein ... sag schnell, wie heißt das doch gleich ... äh ... also so ein Teil eben... äh ... so ein Dingsbums, nicht?« Dann wüsste ich wohl kaum, was du brauchst. Oder schlimmer noch; du musst Teile online kaufen und weißt nicht, wie du das gesuchte Element bezeichnen sollst. Dann wirst du deinen Roboter wohl nicht zu Ende bauen können.

Bezeichnungen sind wichtig. Du kannst die Lego-Bautechniken viel besser beherrschen, wenn du weißt, wie du Lego-Teile bezeichnen und bemessen kannst. Um einen Roman zu schreiben, musst du die Grammatik und den Wortschatz deiner Sprache kennen, und das Gleiche gilt auch für Lego: Du musst die Teile kennen.

Die Elemente im EV3-Set 31313 gehören in die folgenden Kategorien:

Balken: gerade Balken, Winkelbalken, Rahmen, dünne Balken und Verbindungsglieder

Verbinder: Pins, Achsen, Stopper, Achs- und Pinverbinder und Kreuzverbinder

Zahnräder: Stirnräder, Kegelhäder und Schneckenräder

Räder und Raupenkettens: Räder, Raupenkettens und Reifen

Dekorative Elemente: Paneele, Zähne, Schwerter usw.

Sondereile: Bälle, Ballmagazine, Ballschussgerät, Gummiband

Elektronische Teile: EV3-Stein, Motoren, Sensoren und Kabel

HINWEIS Für diese Kategorien habe ich die Namen gewählt, die man sich meiner Meinung nach einfach merken kann. Die offiziellen Bezeichnungen von Lego findest du in Anhang A.

Im Folgenden werde ich die Kategorien kurz beschreiben und mich dabei mit langweiligem Geschwätz möglichst zurückhalten.

Balken

Wie bereits erwähnt sind *Balken* die noppenlosen Gegenstücke zu Technic-Steinen. In diese Kategorie fallen gerade und gewinkelte Balken, Rahmen sowie dünne Balken und Verbindungsglieder. Balken können über runde Löcher für Pins und über kreuzförmige Löcher für Achsen und Achspins verfügen. Verbindungsglieder weisen Kugelpfannen auf, die Pins mit Kugelhöfen aufnehmen können.

Gerade Balken

Abbildung 1-4 zeigt die geraden Balken; die Bezeichnungen dafür findest du in Tabelle 1-1. Als Maßangabe dient die Anzahl der Löcher. Ein gerader Balken mit drei Löchern wird beispielsweise als *3L-Balken* bezeichnet (und hierbei kannst du auf die zusätzliche Angabe von »gerade« verzichten). Das *L* ist eine Maßeinheit, die als »grundlegende Lego-Einheit« oder »Modul« bezeichnet wird (daher manchmal auch *M* genannt) und praktisch die Anzahl der Löcher angibt (1L = ca. 8 mm).

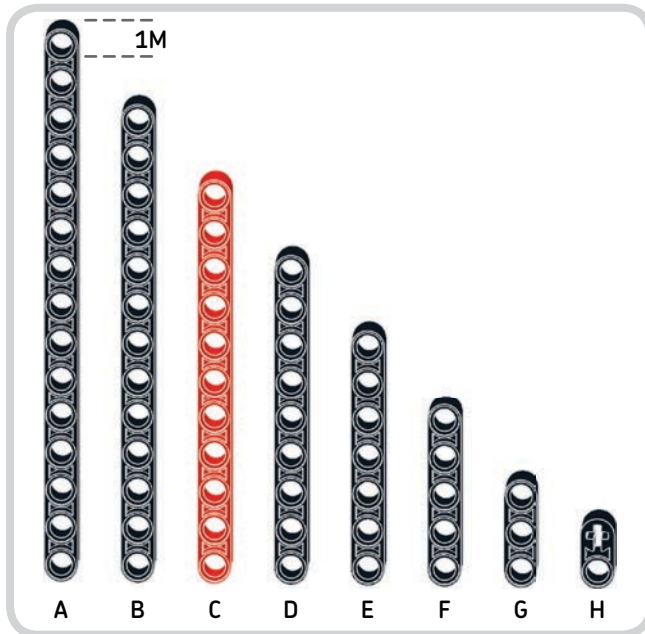


Abbildung 1-4: Die geraden Balken

Tabelle 1-1: Die geraden Balken

Kennbuchstabe in Abb. 1-4	Bezeichnung	Farbe
A	15L-Balken	Schwarz
B	13L-Balken	Schwarz
C	11L-Balken	Rot
D	9L-Balken	Schwarz
E	7L-Balken	Schwarz
F	5L-Balken	Schwarz
G	3L-Balken	Schwarz
H	2L-Balken mit kreuzförmigem Loch	Schwarz

In allen Lego-Bauanleitungen findest du einen Kasten für jeden einzelnen Bauschritt, in dem die in diesem Schritt benötigten Teile angegeben sind. Die Länge eines Balkens ist immer an seiner oberen rechten Ecke angegeben.

Winkelbalken

In Abbildung 1-5 und Tabelle 1-2 findest du die Winkelbalken und deren Bezeichnungen. Befinden sich beispielsweise drei Löcher vor dem Knick und sieben dahinter, spricht man von einem *3 × 7-Winkelbalken*. Diese Art der Bezeichnung wird für alle Winkelbalken verwendet. Beachte, dass manche dieser Balken an ihren Enden kreuzförmige Löcher aufweisen.

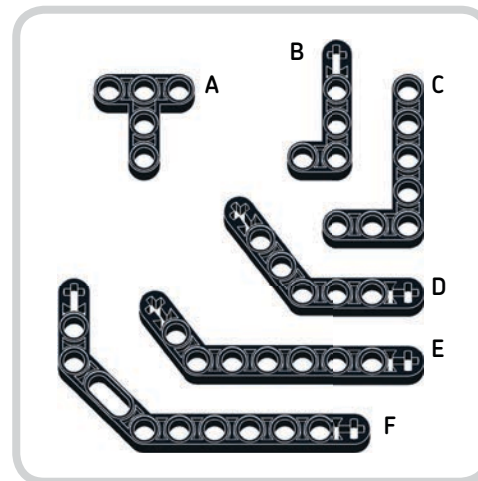


Abbildung 1-5: Die Winkelbalken

Tabelle 1-2: Die Winkelbalken

Kennbuchstabe in Abb. 1-5	Bezeichnung	Farbe
A	T-Balken	Schwarz
B	2 × 4-Winkelbalken	Schwarz
C	3 × 5-Winkelbalken	Schwarz
D	4 × 4-Winkelbalken	Schwarz
E	3 × 7-Winkelbalken	Schwarz
F	Doppelwinkelbalken	Schwarz

Die Balken A, B und C weisen einen rechten Winkel auf, während F über zwei 45°-Winkel verfügt. Was aber ist mit den anderen? In was für einem sonderbaren Winkel sind sie geknickt, und wie kannst du damit etwas Vernünftiges bauen? Wie du mit den verschiedenen Winkelbalken umgehst, erfährst du in Kapitel 8.

Rahmen

Es gibt noch eine besondere Art von Balken, die sogenannten *Rahmen*, die du in Abbildung 1-6 findest. Bezeichnet werden sie nach ihrer Form als *O-Rahmen* (oder einfach *Rahmen*) bzw. *H-Rahmen*. Wenn du erst einmal weißt, wie sie zu verwenden sind, kannst du mit ihnen sehr stabile Strukturen bauen, die nicht auseinanderbrechen!

Dünne Balken und Verbindungsglieder

Abbildung 1-7 und Tabelle 1-3 zeigen *dünne Balken* und *Verbindungsglieder*. Dünne Balken weisen an beiden Enden kreuzförmige Löcher auf und sind nur eine halbe Modullänge (1/2L) dick. Die 6L- und 9L-Verbindungsglieder kannst du dir als Balken mit Kugelpfannen an den Enden vorstellen, in die Pins mit Kugelköpfen passen (die Elemente D und H in Abbildung 1-8). Kugelköpfe ermöglichen sehr freie Drehbewegungen, ähnlich wie in unseren Schulter- und Hüftgelenken.

Tabelle 1-3: Dünne Balken und Verbindungsglieder

Kennbuchstabe in Abb. 1-7	Bezeichnung	Farbe
A	Nocke	Schwarz
B	Dünner 3L-Balken	Grau
C	6L-Verbindungsglied	Schwarz
D	9L-Verbindungsglied	Schwarz

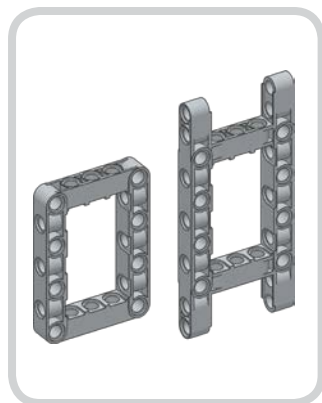


Abbildung 1-6: O-Rahmen und H-Rahmen

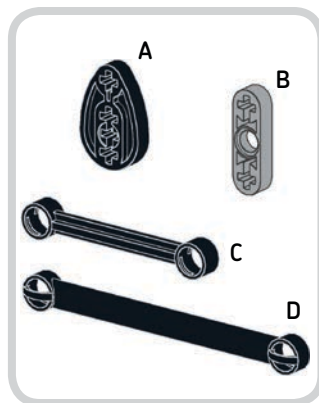


Abbildung 1-7: Dünne Balken und Verbindungsglieder

Verbinder

Die meisten Teile im EV3-Set sind Verbinder. Beim Bauen mit Holz oder Metall verwenden wir Nägel, Leim, Klammern, Schrauben, Bolzen, Unterslegscheiben usw., um die einzelnen Teile zu verbinden. In der wunderbaren Welt von Lego Technic nutzen wir für diesen Zweck Pins, Achsen, Stopper, Achsverbinder und verschiedene Arten von Kreuzverbindern.

Pins und Achspins

Pins werden durch die runden Löcher von Balken gesteckt, um die Balken zusammenzuhalten. Es gibt zwei Arten von Pins: Pins mit Reibung und Pins ohne Reibung (wobei letztere auch *glatte Pins* genannt werden). Abbildung 1-8 und Tabelle 1-4 zeigen Pins, Achspins und Pins mit Kugelköpfen in den Größen 2L und 3L sowie einen besonderen 3L-Pin mit Stopper.

Tabelle 1-4: Pins und Achspins

Kennbuchstabe in Abb. 1-8	Bezeichnung	Farbe
A	Reibungsfreier Pin	Grau
B	Reibungsfreier 3L-Pin	Beige
C	Reibungsfreier Achspin	Beige
D	Achspin mit Kugelkopf	Grau
E	Pin mit Reibung	Schwarz
F	3L-Pin mit Reibung	Blau
G	Achspin mit Reibung	Blau
H	Pin mit Kugelkopf	Schwarz
I	3L-Pin mit Stopper	Rot

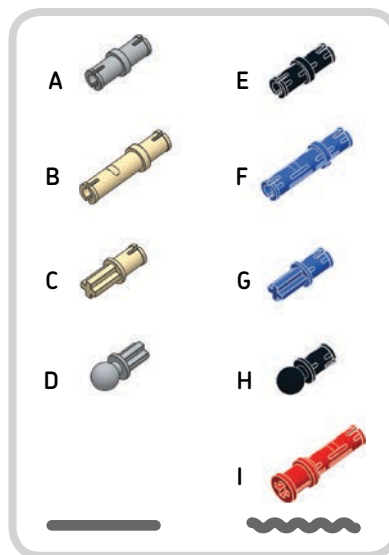


Abbildung 1-8: Die bekannten Technic-Pins. Mit der geraden Linie sind die reibungsfreien Pins gekennzeichnet (A bis C), mit der Wellenlinie die Pins mit Reibung (E bis I). Der Achspin mit Kugelkopf (D) ist zwar technisch gesehen kein glatter Pin, wird hier aber dem Pin mit Kugelkopf (H) gegenübergestellt.

Reibungsfreie Pins (A, B und C in Abbildung 1-8) drehen sich frei und glatt in Technic-Löchern. Sie sind farbig gekennzeichnet: 2L-Pins sind immer grau, 3L-Pins und Achspins dagegen beige. Reibungsfreie Pins werden hauptsächlich zur Verbindung beweglicher Balken eingesetzt.

HINWEIS Der reibungsfreie Achspin C in Abbildung 1-8 ist im EV3-Set nicht enthalten, ich führe ihn hier der Vollständigkeit halber aber trotzdem auf. Auf einem reibungsfreien Achspin kann ein Zahnrad montiert werden, sodass es sich frei drehen kann.

Pins mit Reibung (E, F, G, H und I) weisen Grate auf, die die Reibung erhöhen, sodass sie sich in Technic-Löchern nicht so leicht drehen lassen. Außerdem verhindern die Grate, dass die Pins in den Löchern klappern. 2L-Pins mit Reibung sind stets schwarz, 3L-Pins und Achspins mit Reibung blau. Den 3L-Pin mit Stopper gibt es in vielen Farben, im EV3-Set ist jedoch nur die rote Variante enthalten. Anhand der Farben kannst du die Funktion der Pins auf den ersten Blick erkennen.

Pins mit Reibung eignen sich hervorragend dazu, stabile Strukturen zu bauen, da sie die Balken besser zusammenhalten als reibungsfreie Pins. In den folgenden Kapiteln lernst du viele verschiedene Möglichkeiten für die Verwendung von Pins und Achspins kennen.

Achsen und Stopper

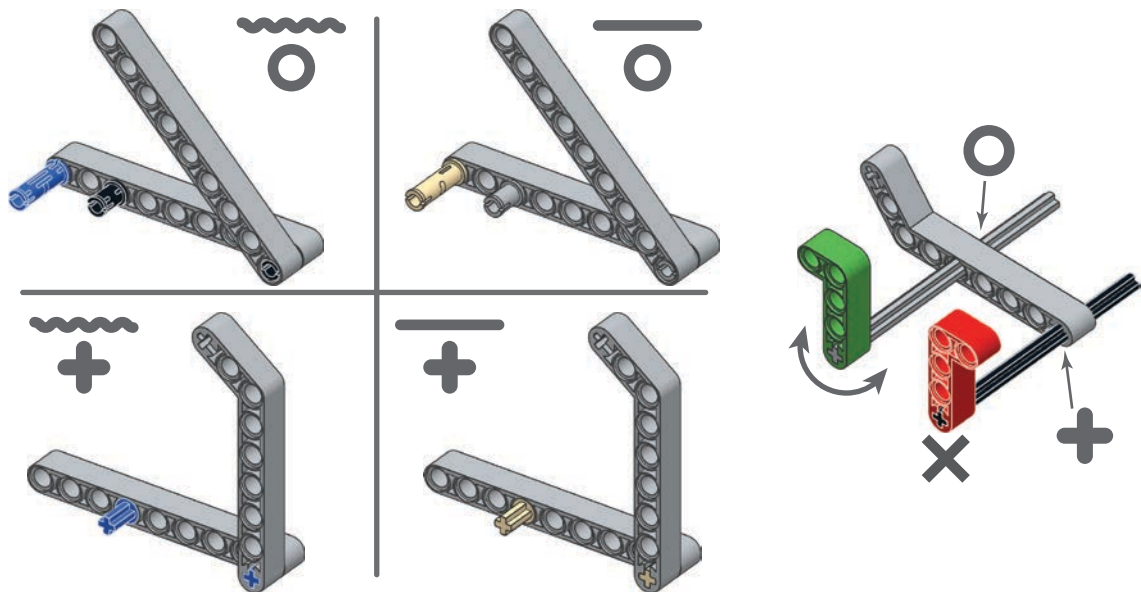
Achsen dienen dazu, eine Drehbewegung zu übertragen, z.B. von einer Motorwelle auf ein Rad. Sie können jedoch auch dazu eingesetzt werden, um Strukturen zusammenzuhalten. Ihr Querschnitt ist kreuzförmig (mit vollständigem Namen heißen sie daher auch *Kreuzachsen*), weshalb sie perfekt mit Elementen verbunden werden können, die kreuzförmige Löcher aufweisen, z.B. Zahnräder, Winkelbalken und Kreuzverbinder.

Ebenso wie Balken sind Achsen in verschiedenen Längen erhältlich. Um sie zu messen, kannst du sie neben einen Balken halten und die Anzahl der Löcher zählen. Wenn du schon mehr Erfahrung mit ihnen hast, kannst du sie auf einen Blick und ohne Nachmessen nach der Größe sortieren. Die Leute werden dich für dein unglaubliches Augenmaß bewundern!

KREUZE UND LÖCHER

Bau die folgenden Konstruktionen zusammen. Die begleitenden Symbole helfen dir, die richtigen Teile auszuwählen. Wellenlinien stehen für Pins mit Reibung (schwarz oder blau), gerade Linien für reibungsfreie Pins (grau oder beige). Ein Pluszeichen bezeichnet einen Achspin, ein Kreis einen runden Pin.

- * Nachdem du die Baugruppen montiert hast, halte sie in der Hand und versuche, den geeigneten Balken zu drehen. Was geschieht?
- * Welcher der beiden 2 x 4-Winkelbalken in der Konstruktion ganz rechts lässt sich am leichtesten drehen?



Wie du in Abbildung 1-9 siehst, sind Achsen ebenso wie Pins farbig gekennzeichnet: Die 2L-Achse ist rot, Achsen mit ungerader Länge (3L, 5L, 7L und 9L) sind hellgrau und längere Achsen geradzahlig Länge (4L, 6L, 8L, 10L, 12L) sind schwarz. Im EV3-Set sind die normalen 4L- und 8L-Achsen nicht enthalten, dafür aber eine beige Achse mit einem zylindrischen Stopper in der Mitte (4c) sowie einige Achsen mit einem Stopper an einem der Enden (3s, 4s und 8s). Im Gegensatz zu den 4L- und 8L-Achsen mit Stopper (4s und 8s) weist die 3L-Achse mit Stopper (3s) eine vorspringende Noppe auf. Die Achsen 3s, 4s und 8s sehen so aus, als sei einer der normalen, auch lose erhältlichen Stopper am Ende fest angefügt, um zu verhindern, dass die Achse aus einem runden oder kreuzförmigen Loch rutscht. Bei der 4c-Achse sitzt der Stopper in der Mitte und sorgt dafür, dass die Achse nicht ganz durch ein kreuzförmiges Loch geschoben werden kann.

In Abbildung 1-9 siehst du auch zwei einzelne Stopper; B1 (gelb, mit einer Dicke von einer halben Lochbreite) und B2 (rot, eine Lochbreite dick). Diese Teile werden gewöhnlich über die Achsen geschoben, um zu verhindern, dass diese aus Löchern rutschen, oder um Elemente in einer Konstruktion auf Abstand zu halten. Da die Stopper meistens zusammen mit Achsen eingesetzt werden, führe ich sie hier zusammen mit ihnen auf.

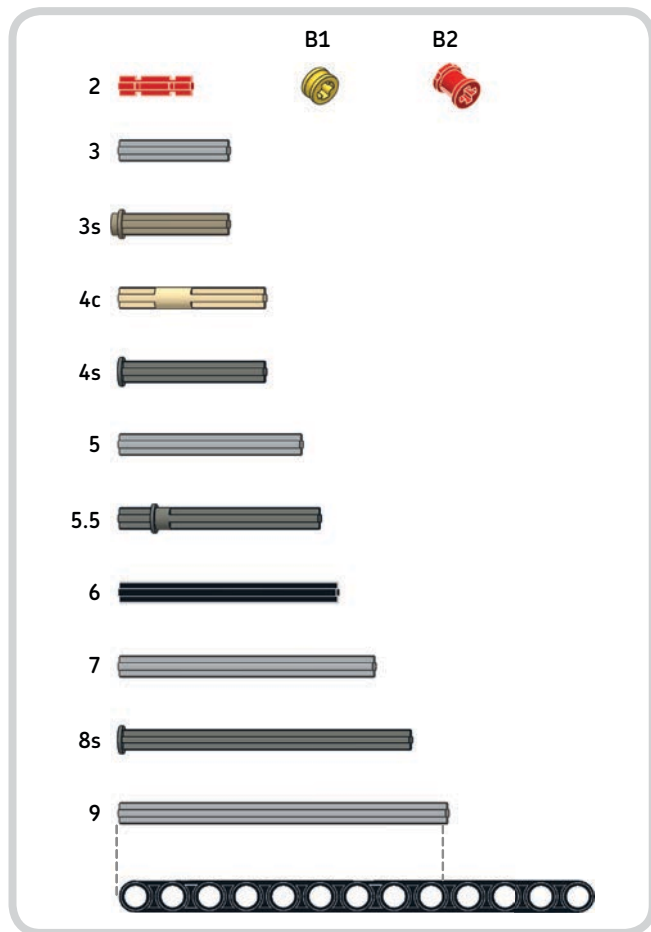


Abbildung 1-9: Achsen und Stopper (mit einem 13L-Balken zum Vergleich)

Achs-, Pin- und Winkelverbinder

Abbildung 1-10 zeigt die Achs-, Pin- und Winkelverbinder, deren Namen in Tabelle 1-5 aufgeführt sind. Die Winkelverbinder (E, F, G und H) werden mit der auf ihnen eingepprägten Zahl bezeichnet.

Tabelle 1-5: Achs-, Pin- und Winkelverbinder

Kennbuchstabe in Abb. 1-10	Bezeichnung	Farbe
A	Verbinder mit Achslöchern	Grau
B	Verbindungsnahe mit drei Achsen	Grau
C	Pinverbinder	Grau
D	Achsverbinder	Rot
E	Winkelverbinder Nr. 1	Rot
F	Winkelverbinder Nr. 2	Rot
G	Winkelverbinder Nr. 4	Rot
H	Winkelverbinder Nr. 6	Rot

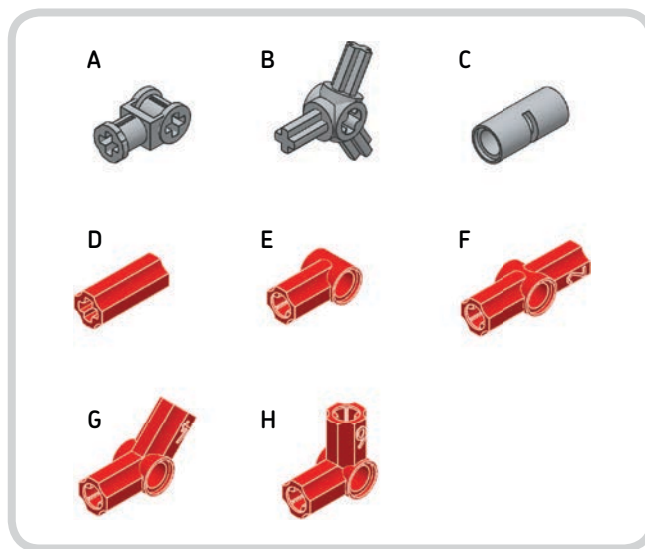


Abbildung 1-10: Achs-, Pin- und Winkelverbinder

Kreuzverbinder

Jetzt geht der Spaß erst richtig los! Kreuzverbinder sind für noppenlose Konstruktionen unverzichtbar, da du mit ihnen in drei Dimensionen bauen – und denken – kannst. Denke daran: Noppenloses Bauen ist nicht so einfach wie das Übereinanderstapeln von Steinen. Hier fügen wir Elemente aus allen Richtungen hinzu, wie du in Abbildung 1-11 gut erkennen kannst.