

Mirko Dölle, Thomas Koch

# Beerenpflücker

## Selbstbau-Roboter mit Raspberry Pi

Ein Raspberry Pi, selbstgemachte Bauteile und ein paar Standard-Komponenten aus dem Internet genügen, um sich einen per Smartphone und WLAN ferngesteuerten Roboter-Arm aufzubauen.

**M**oderne Fertigungstechniken und günstige Standardkomponenten wie der Raspberry Pi und diverse Modellbauteile erlauben heutzutage jedermann, sich für wenig Geld einen Roboter selbst zu bauen. Zur Steuerung benutzen Sie die Neigungssensoren und das Touchpad Ihres Smartphones, das über WLAN gekoppelt wird. Dank Auftragsfertigern aus dem Internet und Standard-Software sind dafür weder größere

handwerkliche Fertigkeiten noch Programmierkenntnisse erforderlich.

Der von uns entwickelte Roboter-Arm kann aus verschiedenen Materialien gefertigt werden, etwa aus Sperrholz, Acryl, Glasfaser, Kohlefaser oder Aluminium. Handwerklich begabte Sparfüchse können sich die benötigten Bauteile selbst zurechtsägen, viel leichter ist es aber, eine CNC-Fräse zu benutzen. Da das größte Bauteil eine Länge

von 25 Zentimetern hat, kommen auch kleine Portalfräsen im A4-Format in Frage. Alternativ suchen Sie sich im Internet einen Auftragsfertiger, der Ihnen die Bauteile anhand von Skizzen aus Acryl, Glasfaser oder Aluminium fräst oder mit einem Laser ausschneidet. Die dafür nötigen Dateien im DXF-Format und eine kleine Auswahl an Fertigungsbetrieben, bei denen Sie die Teile online bestellen können, haben wir Ihnen unter dem c't-Link am Ende des Artikels bereitgestellt. So gefertigt kostet der Teilesatz ab 50 Euro aufwärts bei Fertigungszeiten von vier bis sechs Wochen, wer es eiliger hat, muss deutlich tiefer in die Tasche greifen: Aufschläge von 100 bis 150 Prozent sind für Eilaufträge mit Lieferzeiten unter einer Woche keine Seltenheit.

Den Prototypen des Roboter-Arms haben wir innerhalb einer Stunde mit einer Portalfräse aus einer GFK-Platte von 2 Millimetern Stärke gefräst. Aufgrund der unterschiedlichen Fertigungstoleranzen der einzelnen Produktionsverfahren müssen Sie insbesondere die Bauteile des Standfußes und der Basis mit einer Schlüsselfeile nachbearbeiten, da die Verzapfungen sonst nicht passen. Bei der Konstruktion haben wir bei den Verzapfungen bewusst darauf verzichtet, Toleranzen zuzugeben und damit zu riskieren, dass sie bei präziser Fertigung zu locker sitzen. Schraublöcher hingegen haben wir etwas vergrößert, sodass Sie sie im Normalfall nicht nachbearbeiten müssen.

Für den Antrieb haben wir uns aus dem Modellbau-Sortiment für Hubschrauber bedient. Drei digitale Metallgetriebe-Servos mit einem Drehmoment von gut 1 Newtonmeter sorgen für eine kraftvolle Bewegung von Drehteller, Oberarm und Unterarm (siehe Explosionsansicht auf Seite 166). Bei der Zange kommt ein vergleichsweise schwaches Micro-Servo zum Einsatz, sodass man den Roboter nicht versehentlich überlastet, weil die Zange übermäßig schwere Gegenstände gar nicht erst festhalten kann. Um die Lager der Servos zu schonen, haben wir uns für Axialrollenlager (Nadellager) an allen Drehpunkten entschieden. Aus demselben Grund wurden die Servos in Ober- und Unterarm nicht an den Drehpunkten eingebaut, sondern über Gewindestangen und Kugelgelenke mit den Streben verbunden.

Damit nicht das gesamte Gewicht des Roboters auf dem über Kopf montierten Servo der Basis lastet, haben wir einen doppelt gelagerten Drehteller konstruiert: Die Drehscheibe im Standfuß stützt sich über zwei große Axialrollenlager auf der Bodenplatte und an zwei Deckelplatten des Standfußes ab. Die Basis wird mit Hilfe von Abstandshaltern auf dem Drehteller montiert, sodass das Servo lediglich die Drehkräfte aufbringen muss, aber nicht mit dem Gewicht belastet wird.

## Zusammengebaut

Sämtliche Rahmenteile des Roboter-Arms wurden so konstruiert, dass sie sich mit einer CNC-Fräse oder einem Laser-Schneider in einem Arbeitsgang aus einem Material in

einer einheitlichen Stärke fertigen lassen. Wir haben uns für eine Materialstärke von zwei Millimetern entschieden, sie kann aber auch auf drei Millimeter erhöht werden – man muss dann lediglich die Verzapfungen mit der Feile vergrößern. Wie die Einzelteile zusammengesteckt werden müssen, zeigt die Explosionsansicht auf Seite 166. Dort finden Sie auch die Stückliste mit den Kleinteilen wie Schrauben und Muttern, die Sie für den Zusammenbau benötigen. Außerdem finden Sie unter dem c't-Link neben den DXF-Dateien der Bauteile auch ein Video, das die Herstellung und den Zusammenbau des Prototypen zeigt.

Beginnen Sie damit, die vier Distanzbolzen auf die Drehscheibe des Standfußes zu schrauben. Anschließend montieren Sie die beiden Distanzstücke sowie den Servoteller mit M2-Schrauben auf der Bodenplatte und stecken die Bodenplatte in die zuvor aufgeweiteten Verzapfungen des Standfußes. Jetzt legen Sie den Drehteller mit je einem Axialrollenlager AXK-4565 oberhalb und unterhalb auf die Bodenplatte und passen die beiden Deckelplatten ein. Wichtig ist, dass der Drehteller bei montierten Deckelplatten kein Spiel nach oben oder unten hat, die Axiallager aber auch nicht klemmen. Der Drehteller sollte sich mit einem Finger mühelos drehen lassen. Auch die quer verlaufenden Fußstreben sollten Sie so einpassen, dass sich die Verzapfungen ohne Kraftaufwand verbinden lassen.

Die Bauteile der Basis werden ebenfalls nur ineinander gesteckt und mit zwei Distanzbolzen M4x50 verschraubt. Montieren Sie zunächst keine Servos, die kommen erst ganz zum Schluss. Die vier Streben des Unterarms werden mit je einem Axialrollenlager AXK-0414 und einer M4x12-Schraube mit der Basis verschraubt. Sparfüchse verwenden anstelle der Axiallager zwei geölte KFZ-Unterlegscheiben. Ziehen Sie die Schrauben nur ganz leicht an, damit die Streben beweglich bleiben. Damit sich die Verschraubungen nicht später durch die Bewegung des Roboters wieder lösen, müssen Sie unbedingt Schraubensicherungsack (etwa blaues Loctite 241) an allen Drehpunkten oder selbstsichernde Muttern verwenden.

Am oberen Ende der Unterarm-Streben montieren Sie die Seitenteile des Ellenbogens, wiederum zunächst ohne Servo. Zwei Distanzbolzen M4x50 sorgen hier für Stabilität. Beim Anbringen der Unterarm-Streben müssen Sie darauf achten, die Strebe mit der Servo-Anlenkung auf der Seite des Ellenbogens anzubringen, wo auch das Servo eingebaut wird. Für die Verschraubungen verwenden Sie durchgehend Schrauben in M4x12 und passende Muttern oder Distanzbolzen.

Die insgesamt vier Streben von Ober- und Unterarm sorgen dafür, dass die am Ende des Unterarms befestigte Zange stets parallel zum Boden bewegt wird. Die beiden Spannzangen sind die einzigen Komponenten des Roboters, die mit M3-Schrauben und -Muttern verschraubt werden. Am besten bauen Sie die Zange Schicht für Schicht von unten nach oben auf, beginnend mit den Spann-



**Mit einer Portalfräse können Sie die Rahmenteile des Roboters leicht selbst fertigen – oder Sie bestellen sie bei einem Auftragsfertiger via Internet.**

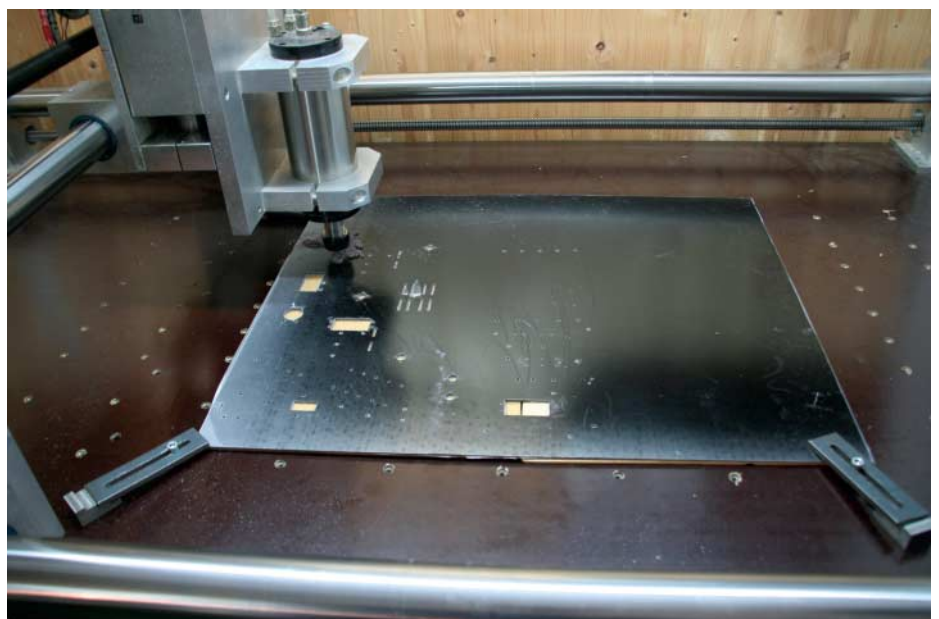
zangen, dann lassen sich die Axiallager auch leicht auf die M4-Schrauben an der Basisplatte der Zange auffädeln. Haben Sie den Roboter mit Ausnahme der Servos komplett montiert, prüfen Sie noch mal die Bewegungsfreiheit des Arms und die Anzugsmomente der Schrauben – der Sicherungsack benötigt etliche Minuten, bis er ausgehärtet ist.

### Angesteuert

Für die Ansteuerung des Servos haben wir einen I2C-Bus-Controller von Adafruit für knapp 15 Euro ausgewählt (siehe c't-Link).

Jeder der mehrfach kaskadierbaren Controller steuert bis zu 16 Modellbauservos, wobei die Stellung lediglich ein Mal via I2C-Bus übertragen werden muss – anschließend hält der Controller das Servo von selbst in der gewünschten Position.

Der Vorteil dieser Controller besteht darin, dass der Raspberry Pi massiv entlastet wird. Modellbauservos verwenden für die Positionierung ein Rechteck-Signal, dessen Pulsbreite zwischen ein und zwei Millisekunden liegen muss. Da der Mini-Computer nur einen einzelnen PWM-Anschluss besitzt, müsste man die vier Servos des Roboter-

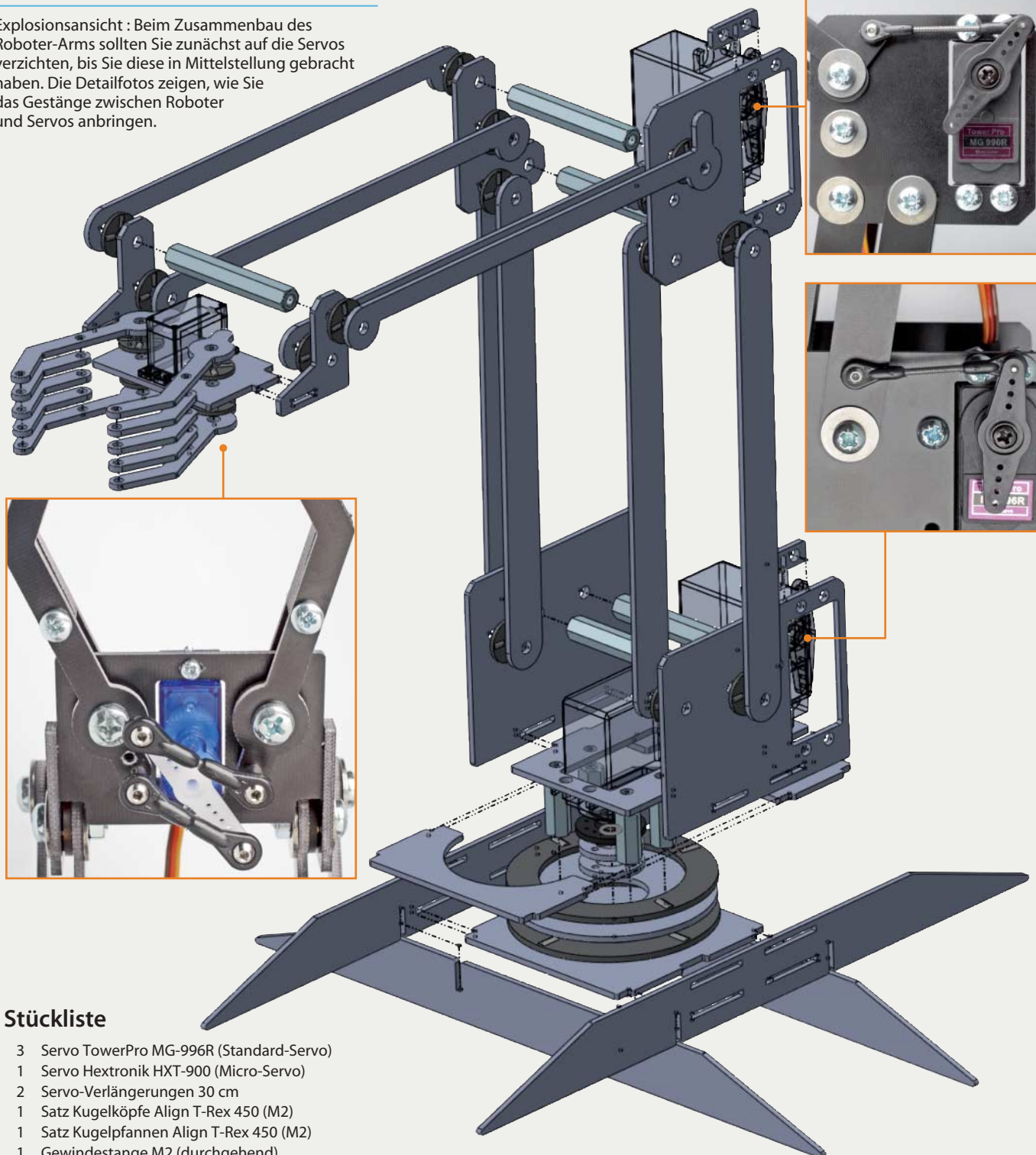


**Gut eine Stunde dauert es, bis die Roboter-Teile aus einer GFK-Platte herausgefräst sind. Auch Sperrholz, Acryl, Kohlefaser oder Aluminium kommen als Werkstoffe in Frage.**



## c't Roboter-Arm

Explosionsansicht : Beim Zusammenbau des Roboter-Arms sollten Sie zunächst auf die Servos verzichten, bis Sie diese in Mittelstellung gebracht haben. Die Detailfotos zeigen, wie Sie das Gestänge zwischen Roboter und Servos anbringen.



### Stückliste

- |    |   |    |                                 |   |                              |
|----|---|----|---------------------------------|---|------------------------------|
| 3  | Servo TowerPro MG-996R (Standard-Servo)   | 6  | Schrauben M2×15                 | 1 | Basis-Seitenteil geschlossen |
| 1  | Servo Hextronik HXT-900 (Micro-Servo)     | 4  | Schrauben M3×15                 | 1 | Basis-Seitenteil für Servo   |
| 2  | Servo-Verlängerungen 30 cm                | 2  | Schrauben M4×15                 | 1 | Basis-Grundplatte für Servo  |
| 1  | Satz Kugelhöpfe Align T-Rex 450 (M2)      | 38 | Schrauben M4×12                 | 4 | Distanzplatten für Servo     |
| 1  | Satz Kugelpfannen Align T-Rex 450 (M2)    | 6  | Sechskant-Muttern M2            | 2 | Drehlager-Deckel             |
| 1  | Gewindestange M2 (durchgehend)            | 4  | Sechskant-Muttern M3            | 2 | Distanzscheiben für Servo    |
| 20 | Axialrollenlager AXK 0414 (4 mm × 14 mm)  | 20 | Sechskant-Muttern M4            | 1 | Drehscheibe                  |
| 2  | Spannzangen mit Anlenkung                 | 1  | Ellenbogen-Seitenteil L-Form    | 1 | Bodenplatte                  |
| 6  | Spannzangen-Mittelstücke                  | 1  | Ellenbogen-Seitenteil für Servo | 2 | Standfüße                    |
| 1  | Zangen-Grundplatte für Servo              | 4  | Oberarm-Streben                 | 2 | Standfüße mit Aussparungen   |
| 2  | Handgelenk-Seitenteile                    |    |                                 |   |                              |
| 3  | Unterarm-Streben                          |    |                                 |   |                              |
| 1  | Unterarm-Strebe mit Anlenkung             |    |                                 |   |                              |
| 2  | Axialrollenlager AXK 4565 (45 mm × 65 mm) |    |                                 |   |                              |
| 5  | Distanzbolzen M4×50 Sechskant             |    |                                 |   |                              |
| 4  | Distanzbolzen M4×17 Sechskant             |    |                                 |   |                              |

Arms durch separates, Microsekunden-genaues Ein- und Ausschalten von vier GPIO-Pins ansteuern, um Rechtecksignale mit der gewünschten Pulsbreite zu erzeugen. Kommt es infolge von I/O-Operationen oder durch hohe Auslastung des Prozessors zu Verzögerungen, hat dies eine sofortige, undefinierte Reaktion der Servos zur Folge. Schlimmstenfalls würde der Roboter unkontrolliert um sich schlagen und die Mechanik ruinieren.

Außerdem übernimmt der Controller auch die Stromversorgung der Servos. Diese benötigen je nach Typ bis zu 500 Milliampere pro Stück. Keinesfalls sollten Sie für die Servo-Stromversorgung und den Raspberry Pi dasselbe Netzteil benutzen – die Servos sorgen für erhebliche Störungen und können damit den Mini-Rechner sogar zum Absturz bringen. Wir empfehlen daher ein separates Netzteil mit 5 Volt und 2 bis 3 Ampere für den Servo-Controller. Der Controller-Chip selbst wird vom Raspberry Pi mit Strom versorgt (+3,3 Volt von Pin 1 und Masse von Pin 9) und erhält die Steuersignale per I2C-Bus (SDA an Pin 3 und SCL an Pin 5).

Als Betriebssystem für den Raspberry Pi empfehlen wir Raspbian, das Sie von raspberrypi.org herunterladen und mit dem Win32 Disk Imager unter Windows oder dd unter Linux auf eine SD-Karte (Raspi Modell B) oder Micro-SD-Karte (Modell B+) übertragen. Für den ersten Start müssen Sie den Raspi an Monitor und Tastatur anschließen, damit Sie das automatisch gestartete Konfigurationsprogramm raspi-config bedienen können. Passen Sie dort die Sprach- und Tastatureinstellungen an (Internationalisation Options), aktivieren Sie SSH und I2C (Advanced Options) und lassen Sie das Dateisystem auf die Größe der SD-Karte anpassen (Expand Filesystem). Verlassen Sie das Programm mit „Finish“ und führen Sie den dann angebotenen Neustart des Systems durch. Alle weiteren Anpassungen können Sie anschließend auch per SSH vornehmen – die IP-Adresse zeigt der Raspi nach dem Booten oberhalb des Logins an.

Um den Servo-Controller in Betrieb zu nehmen, benötigen Sie eine Python-Bibliothek vom Hersteller Adafruit. Diese laden Sie von Github herunter:

```
git clone https://github.com/adafruit/Adafruit-Raspberry-7
Pi-Python-Code.git
```

Anschließend installieren Sie auf dem Raspi noch ein paar zusätzliche Python-Bibliotheken und kopieren die Servo-Bibliotheken in das Python-Library-Verzeichnis:

```
sudo apt-get -y install python-twisted-core python-7
twisted-web python-setuptools python-dev
sudo cp -L Adafruit*/Servo_Driver/A*7
/usr/local/lib/python2.7/dist-packages/
```

Für die Fernsteuerung des Roboter-Arms haben wir den Python-Daemon berrypicker entwickelt und als Debian-Paket zum Download bereitgestellt (siehe c't-Link). Dieser enthält einen Webserver und kommuniziert via Websockets mit dem fernsteuern-



Als Fernsteuerung dient ein Smartphone oder Tablet. Um den Roboter zu drehen oder den Unterarm zu heben oder zu senken, genügt es, das Mobilgerät zu bewegen. Für Oberarm und Zange bewegen Sie beide Daumen auf den angeordneten Joysticks.

den Browser. Dazu verwenden wir die Twisted Network Engine und die Autobahn Websocket Library. So gelingt sogar die Abfrage der Neigungssensoren von Mobilgeräten – wie das im Detail funktioniert, erklären wir in einer kommenden Ausgabe. Twisted und Autobahn müssen Sie aus den Quellen installieren, wozu Sie die Archive (siehe c't-Link) zunächst herunterladen und anschließend entpacken und installieren:

```
tar xjf Twisted*.tar.bz2
sudo python Twisted*/setup.py install
unzip autobahn*.zip
sudo python autobahn*/setup.py install
sudo dpkg -i berrypicker*.deb
```

Der Beerenpflücker-Daemon startet automatisch und versucht, mit dem Servo-Controller zu kommunizieren. Dabei führt er zunächst alle vier Servos in die Mittelstellung. Schließen Sie nun im laufenden Betrieb alle vier Servos an die Ports 0 bis 3 des Servo-Controllers an, mit der schwarzen oder braunen Leitung (Masse) nach außen. Sobald ein Servo Kontakt zum Controller hat, bewegt es sich in die Mittelstellung – markieren Sie diese auf der Antriebsachse mit einem Stift oder einem Feilen-Strich. So erkennen Sie beim Einbau der Servos, wenn Sie sie versehentlich verdreht haben.

## Ferngesteuert

Um die Servo-Steuerung zu testen, öffnen Sie einen Browser und kontaktieren den Beerenpflücker-Daemon auf Port 80 per HTTP. Dort finden Sie die Fernbedienungs-Oberfläche, auf der Sie mit der Maus die einzelnen Achsen des Roboter-Arms bewegen können. Bewegen sich alle vier Servos, können Sie sie einbauen. Die Detailfotos auf Seite 166 zeigen, wie Sie das Gestänge und die Kugelköpfe korrekt anbringen. Dabei verwenden Sie für die großen Servos die kurzen Kugelköpfe aus dem Hubschrauber-Set und für die Zangen die langen Kugelköpfe. Der Bohrlochdurchmesser für die langen Kugelköpfe beträgt 2,3 Millimeter, für die kurzen Kugelköpfe und die Gewindelöcher der Kugelpfannen jeweils 1,8 Millimeter.

Als Fernsteuerung für den Roboter-Arm verwenden Sie ein Smartphone oder Tablet, das Sie per WLAN mit dem Raspberry Pi koppeln. Dazu benötigen Sie einen WLAN-USB-Adapter, etwa einen TP-Link TL-WN821N für unter 10 Euro. Damit der Raspi als WLAN-Access-Point arbeitet, installieren Sie folgende Pakete:

```
sudo apt-get -y install hostapd dnsmasq avahi-daemon
```

Die Konfigurationsdateien für HostAP, DNS-Masq und den Avahi-Daemon haben wir Ihnen zum Download bereitgestellt. Sofern Sie in der HostAP-Konfigurationsdatei keine Verschlüsselung aktivieren, wird Ihr Raspberry Pi zum offenen WLAN-Access-Point mit der SSID beerenpfluecker, mit dem sich jedes WLAN-Gerät verbinden kann. Das ist praktisch für Vorführungen, so kann jeder mit seinem Smartphone den Roboter steuern.

Um Umwandern die umständliche Eingabe der IP-Adresse des Raspi zu ersparen, haben wir Ihnen noch den Fake-DNS-Daemon fakedns.py als Debian-Paket zum Download bereitgestellt: Er lenkt sämtliche Anfragen auf die IP-Adresse des WLAN-Adapters um, sodass man automatisch auf der Fernbedienungs-Seite landet, sobald man eine beliebige Internetadresse im Browser öffnet. Installieren Sie den FakeDNS folgendermaßen:

```
sudo dpkg -i fakedns*.deb
```

Auf Mobilgeräten können Sie zwischen zwei Steuerungsmodi wählen: Zwei Zweiachs-Joysticks oder zwei Einachs-Joysticks und das Gyroskop Ihres Smartphones oder Tablets. Per Gyroskop steuern Sie die Drehscheibe und den Unterarm, Oberarm und Zange hingegen mit den Daumen auf den angeordneten Joysticks. Die Umschaltung erfolgt über das Symbol in der Mitte zwischen den Joysticks. Wir haben das Gyroskop so kalibriert, dass der Nullpunkt etwa bei 45 Grad Neigung des Displays liegt. Dennoch sollten Sie sicherheitshalber die Ausrichtungssperre des Displays aktivieren, wenn Sie das Gyroskop verwenden – damit Ihre Roboter-Fernbedienung nicht plötzlich Kopf steht. (mid)

**ct** Baupläne, CAD-Dateien und Software:  
[ct.de/ycv3](http://ct.de/ycv3)