

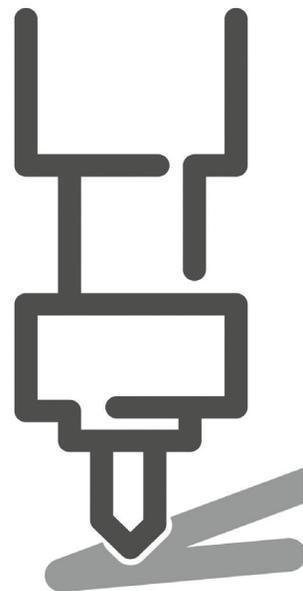
#makers  
DO IT.



Ralf Steck

# CNC- FRÄSEN für Maker

2. Auflage



Baue, programmiere und steuere  
deine DIY-Fräse

HANSER



Steck  
**CNC-Fräsen für Maker**



**Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!**

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial. Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

**plus-AE2hc-ktP6F**

**[plus.hanser-fachbuch.de](http://plus.hanser-fachbuch.de)**



**Bleiben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**



Ralf Steck

# CNC-Fräsen für Maker

Baue, programmiere und steuere deine DIY-Fräse

2., aktualisierte Auflage

HANSER

Der Autor:  
*Ralf Steck*, Friedrichshafen



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht, auch nicht für die Verletzung von Patentrechten, die daraus resultieren können.

Ebenso wenig übernehmen Autor und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz- Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

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.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2022 Carl Hanser Verlag München

[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Julia Stepp

Herstellung: Melanie Zinsler

Coverrealisierung: Max Kostopoulos

Titelillustration: © ZenziWerken.de, Daniel Groß

Satz: Eberl & Koesel Studio GmbH, Altusried-Krugzell

Druck und Bindung: Druckerei Hubert & Co. GmbH und Co. KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany

Print-ISBN: 978-3-446-47160-3

E-Book-ISBN: 978-3-446-47407-9

ePub-ISBN: 978-3-446-47408-6

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1	An wen richtet sich dieses Buch? .....	3
1.2	Von der Idee zum Span: Wie ist dieses Buch aufgebaut? .....	8
1.3	Danksagungen .....	11
<b>2</b>	<b>Schnelleinstieg in die Welt der CNC-Fräsen: Aufbau, Funktionsweise und Marktübersicht</b> .....	<b>13</b>
2.1	Von CAD zu CNC: Der Datenworkflow .....	14
2.2	Bestandteile einer CNC-Fräsmaschine .....	18
2.2.1	Kommandosache: Die Steuerung .....	18
2.2.2	Antreiber: Die Motorenendstufen .....	21
2.2.3	Einer nach dem anderen: Die Schrittmotoren .....	22
2.2.4	Immer geradeaus: Die Achsführungen .....	23
2.2.5	Vorwärtsdrang: Die Achsantriebe .....	24
2.2.6	Es geht rund: Die Spindel .....	27
2.2.7	Basis für alles: Die Arbeitsplatte .....	30
2.3	Von Achsen und Dimensionen: Was kann eine Fräsmaschine leisten? .....	30
2.4	Es ist nicht alles Käse! Der Einsatz von Werkstoffen .....	35
2.5	Shapeoko – die im Buch eingesetzte CNC-Fräse .....	38
2.6	Hobby-Fräsmaschinen: Eine kleine Marktübersicht .....	39
2.6.1	„Chinafräsen“ .....	39
2.6.2	BZT .....	40
2.6.3	GoCNC .....	41
2.6.4	Proxxon .....	42
2.6.5	Shaper Origin .....	42
2.6.6	Sorotec .....	44
2.6.7	Stepcraft .....	45
2.6.8	MechaPlus .....	46

2.6.9	EMS Möderl .....	46
2.6.10	Shapeoko .....	47
2.7	Rund um die Maschine: Peripherie und Zubehör .....	48
2.7.1	Hiergeblieben! Werkstückbefestigung .....	48
2.7.2	Saubermann: Die Späneabsaugung .....	50
2.7.3	Wo bist du? Der Werkzeuglängensensor .....	51
2.7.4	Alles im Kasten: Das Gehäuse .....	53
2.7.5	Jetzt geht's rund! Die vierte Achse .....	54
<b>3</b>	<b>Gedankenspiele: Die Grundlagen des FräSENS</b> .....	<b>57</b>
3.1	Welcher Fräser ist für welchen Einsatz geeignet? .....	57
3.2	Schnittwerte: Bitte die Richtgeschwindigkeit beachten! .....	64
3.3	Routenplanung: Die richtige Frässtrategie .....	67
3.3.1	Hü oder hott: Gegen- und GleichlaufräSEN .....	67
3.3.2	Schruppen, Schichten und Restmaterial .....	69
3.3.3	Die richtige Frässtrategie für verschiedene Anwendungen .....	71
3.4	Nullpunkte: Wo bin ich und wer bin ich? .....	75
<b>4</b>	<b>Vor dem FräSENbau: Kauf- und Bauvorbereitungen</b> .....	<b>79</b>
4.1	Wie groß soll die FräSE werden? .....	79
4.2	Wer liefert was? Bauteile und Bezugsquellen .....	82
4.3	Die Kostenfrage: Bestelllisten und Preise .....	87
4.4	Werkzeug und Zubehör: Was braucht es noch? .....	91
<b>5</b>	<b>Endlich schrauben! Der mechanische Aufbau der FräSE</b> .....	<b>93</b>
5.1	Rolling, rolling, rolling: Die Kleinteile .....	94
5.2	Auf und ab: Die Z-Achse .....	96
5.3	Hin und her: Der X-Schlitten .....	100
5.4	Brückenbau: Das X-Portal .....	104
5.5	Am Boden: Die Y-Achse .....	109
5.6	Exkurs: FräSEN einer Arbeitsplatte mit Shaper Origin .....	116
5.6.1	Shaper Origin – die handgeführte CNC-FräSE .....	116
5.6.2	Erste Erfahrungen mit CAD: Der Arbeitstisch entsteht in Fusion 360 .....	119
<b>6</b>	<b>Der LötKolben glüht! Aufbau der FräSEnelektronik und -steuerung</b> .....	<b>127</b>
6.1	Verbindendes und Trennendes: Leitungen und Schalter .....	128
6.2	Gute Führung: Verlegung der Leitungen und Anschluss der Steuerung .....	137

6.3	Das Gehirn der Fräse: Der Steuerrechner .....	142
6.4	Erstkontakt: Verbinden von bCNC mit GRBL .....	149
<b>7</b>	<b>Jetzt wird es ernst! Die Inbetriebnahme der Fräse .....</b>	<b>151</b>
7.1	Richtungsweisend: GRBL richtig einstellen .....	151
7.2	Oberflächlich: Erste Schritte in bCNC .....	160
7.3	Späne fliegen: Das erste Fräsprojekt .....	164
7.4	Fixiert: Haltestege einplanen hilft gegen Projektilen .....	170
7.5	Sicher ist sicher: Sicherheit an der Maschine .....	172
<b>8</b>	<b>Von der Vision zur Realität: Der CAD-CAM-NC-Workflow .....</b>	<b>175</b>
8.1	Estlcam: CAM/CNC-Software made in Germany .....	176
8.2	Zeichen setzen: Gravieren mit Estlcam .....	179
8.3	Da schau her! G-Codedateien lesen .....	185
8.4	Tiefschürfend: Vorgegebene Daten fräsen .....	188
8.5	Die Späne fliegen: Tipps zur Arbeit an der Fräse .....	197
8.6	Hoch hinaus! Fräsen eines Flugzeug-Spantengerüsts .....	199
8.7	3-Achs-Fräsen: In alle Richtungen .....	206
8.8	CAD/CAM vereint: Ein komplett in Fusion 360 realisiertes Projekt .....	212
<b>9</b>	<b>Optimierungswahn: Diverse Fräsen-Upgrades und -ergänzungen .....</b>	<b>227</b>
9.1	Fiat Lux! Es werde Licht im Arbeitsraum .....	227
9.2	Grenzen setzen: Abdeckbleche und Kabelführung .....	230
9.3	Messgerät: Der Werkzeuglängentaster .....	231
9.4	Sauber, sauber: Die Absaugung .....	239
9.5	CNC-Staubsaugen: Die Absaugung über G-Code steuern .....	243
<b>10</b>	<b>Die Kür: 4-Achs-Steuerung und vierte Achse .....</b>	<b>245</b>
10.1	Getrennt und doch gemeinsam: Der Aufbau der Steuerung .....	248
10.2	Spekulativ: Die Hardware für die vierte Achse .....	256
10.3	Drehwurm: Fräsen mit der Drehachse .....	258
<b>11</b>	<b>Am Endschalter: Fazit und Ausblick .....</b>	<b>265</b>
	<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>267</b>



# 1

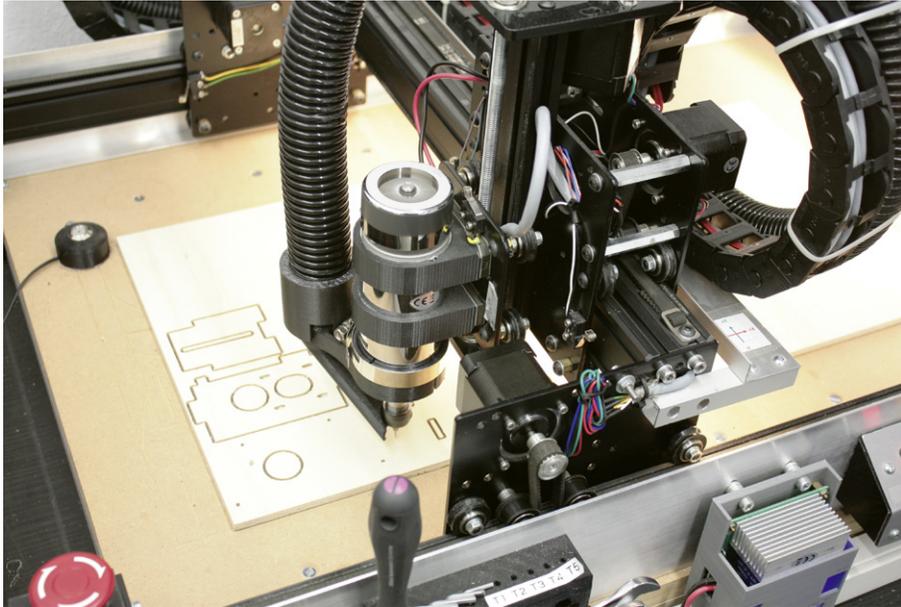
## Einführung

Für den Maker ist eine CNC-gesteuerte Fräse sicher eines der interessantesten Projekte, die er angehen kann. Neben dem 3D-Drucker und dem Lasercutter dürfte die CNC-Fräse zu den automatisierten Werkzeugen zählen, die in Kreisen von Makern, Modellbauern, Bastlern und Technikfreaks am häufigsten eingesetzt werden. Dieses Buch führt in die Anschaffung, den Bau und den Einsatz einer solchen Fräse ein. Ziel ist nicht, professionelle Fräsqualität zu erreichen, sondern mit überschaubarem Budget eine möglichst zuverlässige, einfach zu verstehende und produktive CNC-Maschine zu bauen. Dazu müssen auch einige Abstriche gemacht werden, auf die ich im Folgenden noch eingehen werde.

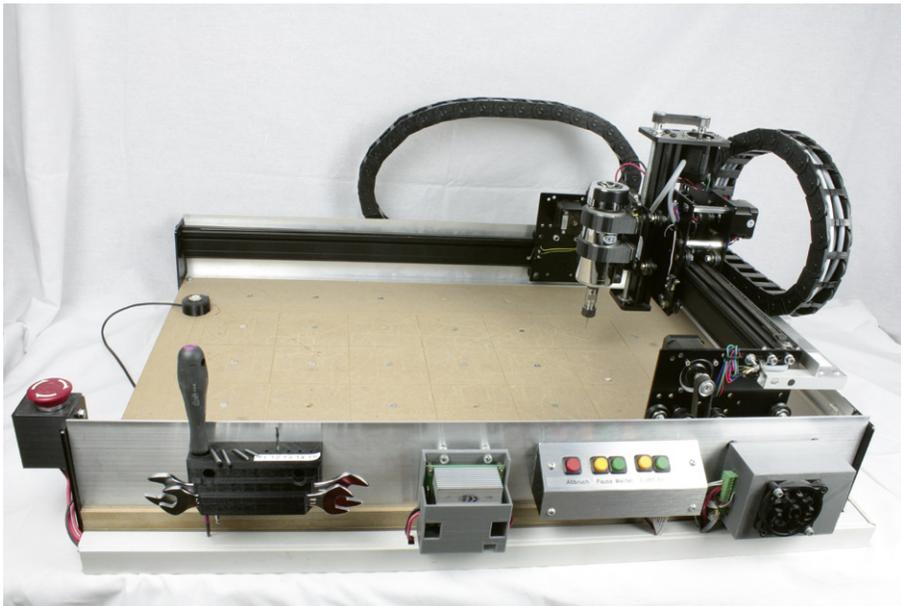
Das CNC-Fräsen ist eines der wichtigsten Fertigungsverfahren in der Industrie. Vor allem wenn es um Metallteile geht, führt kaum ein Weg daran vorbei. Auch in der Kunststoffteileherstellung sind Fräsmaschinen unverzichtbar – hier allerdings nicht direkt zur Fertigung, sondern für die Herstellung der Spritzgussformen, in denen dann die Kunststoffteile gefertigt werden.

Profimaschinen sind sehr genau und schnell. Sie sind mit automatischen Werkzeugwechslern und Bestückungsrobotern ausgestattet, um eine Serienfertigung mit möglichst geringem Anteil an manuellen Handgriffen zu ermöglichen. All diese Anforderungen – bis auf die Genauigkeit, aber auch diese mit Abstrichen – haben wir im Hobbybereich nicht. Professionelle CNC-Bearbeitungszentren kosten deshalb auch sechs- oder siebenstellige Beträge, während Hobbymaschinen im hohen drei- oder niedrigen vierstelligen Bereich liegen. Natürlich sind auch im Hobbybereich die Grenzen fließend. In manchem Hobbykeller steht ein Maschinenpark, den man eher in einem Kleinunternehmen vermuten würde.

In diesem Buch stelle ich eine preiswerte, aber leistungsstarke computergesteuerte 2,5D-/3D-Fräsmaschine für ein Budget um ca. 1000 Euro vor. Ich arbeite dabei auf Basis des Open-Source-Projekts Shapeoko, sodass du die Maschine nach deinen Vorstellungen gestalten und trotzdem von diesem Buch profitieren kannst (Bild 1.2). Mit einer Absaugung, einem Werkzeuglängentaster, einem Upgrade für Motoren und Steuerung sowie einer einfachen vierten Achse zeige ich Erweiterungs- und Ausbaumöglichkeiten auf.



**Bild 1.1** Mit einer CNC-Fräse lassen sich die unterschiedlichsten Dinge erstellen. Hier entstehen die Holzteile für die vierte Achse.



**Bild 1.2** Was man für etwa 1000 Euro bekommt: eine Shapeoko-X-Fräse

## ■ 1.1 An wen richtet sich dieses Buch?

Interessierst du dich für die CNC-Technik? Hast du schon einen 3D-Drucker und möchtest in die „subtraktive“ Welt hineinschnuppern? Bist du Modellbauer, Maker oder ambitionierter Bastler? Dann wirst du dich in diesem Buch wiederfinden.



In der Maker-Szene duzt man sich. Deshalb spreche ich meine Leser mit „du“ an. Ich habe das Buch so aufgebaut, als ob wir zusammen in deinem oder meinem Hobbykeller säßen und das Projekt „CNC-Fräse“ gemeinsam angehen würden.

Um die CNC-Fräsmaschine zu betreiben, benötigst du digitale 2D- oder 3D-Vorlagen. CAD-Kenntnisse sind also hilfreich, allerdings werde ich in Kapitel 8 den kompletten Workflow von der Modellierung im CAD-System über die CNC-Programmierung im CAM-System bis zur Maschinensteuerung beispielhaft vorstellen, sodass du eine Idee bekommst, wie die Vorlagen entstehen. Darüber hinaus kann ich mein Buch *CAD für Maker* (ISBN 978-3-446-45681-5) empfehlen, in dem ich detailliert in die 3D-Modellierung einführe (Bild 1.3).



**Bild 1.3** Mein Buch *CAD für Maker* enthält Anleitungen zur 3D-Modellierung.

Im Zuge der Arbeit an meinem Buch *CAD für Maker* beschäftigte ich mich auch erstmals seit dem Maschinenbaustudium wieder mit CNC-Fräsmaschinen. Ich kann mich also gut in die Situation, die man als CNC-Neuling durchläuft, hineinversetzen.

Entsprechend habe ich *CNC-Fräsen für Maker* aufgebaut. Ich habe eine Liste von Anforderungen zusammengestellt, die eine Hobbyfräse in meinen Augen erfüllen sollte:

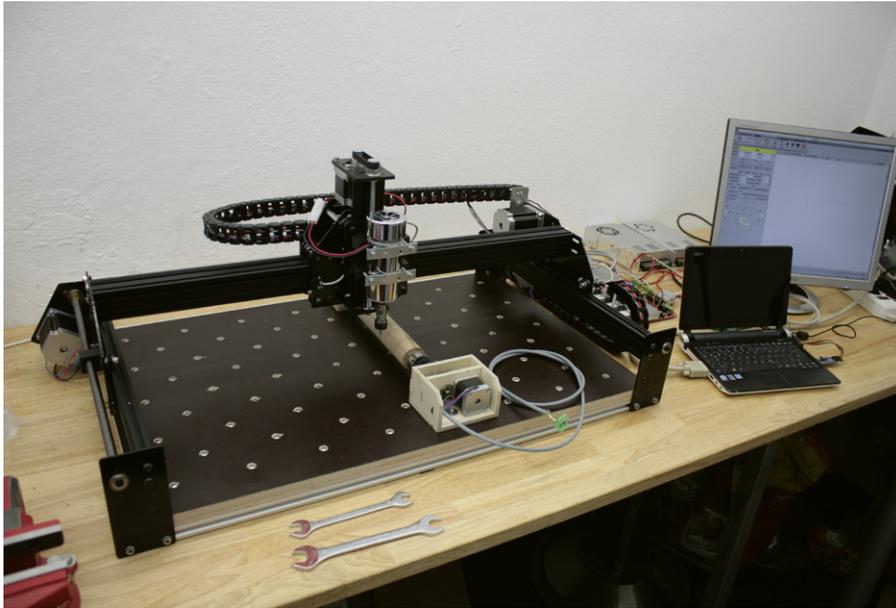
- Sie soll preiswert sein.
- Sie soll einfach bedienbar und aus einfach verfügbaren Standardteilen aufgebaut sein.
- Sie soll einfach erweiterbar sein.
- Sie soll eine große Community im Internet haben, die bei Problemen weiterhelfen und Tipps geben kann.
- Die Maschine soll Holz und Kunststoffe bearbeiten können.
- Die Möglichkeit, Aluminium zu bearbeiten, wäre schön, ist aber nicht Voraussetzung.
- Die Maschine soll mit kostenloser Software zu betreiben sein.
- Sie soll „bürotauglich“ sein, das heißt, die Maschine soll im Betrieb nicht allzu viel Schmutz und Lärm erzeugen und kompakt sein.
- Sie soll „genau genug“ sein.



**Bild 1.4** Auch dieses Projekt aus meinem Buch *CAD für Maker* entstand auf der Shapeoko-X.

Selbstbau steht bei mir an erster Stelle. Natürlich gibt es eine Vielzahl von Fräsmaschinen, die bereits fertig aufgebaut zu kaufen sind. Doch meiner Meinung nach erwirbt man erst dann echtes Wissen in einem Bereich, wenn man die Materie – zumindest in der Theorie – so weit durchdenkt, dass man eigene Entscheidungen treffen kann. Nur dann wird man sich die richtigen Geräte und Werkzeuge anschaffen.

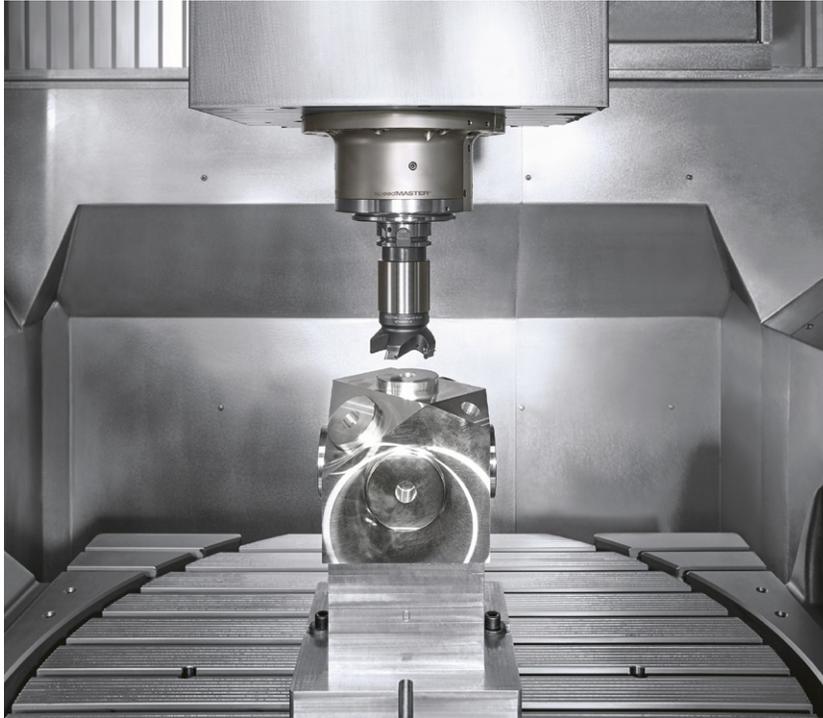
Wir bauen in diesem Buch eine Shapeoko-Fräse (für nähere Ausführungen siehe Kapitel 2) und folgen damit einem bestimmten Bauplan. Das hat den Vorteil, dass wir Bausätze verwenden beziehungsweise vorkonfigurierte Pakete einkaufen können und uns damit die Mühe sparen, eine Vielzahl einzelner Schrauben, Scheiben und Rollen im Internet zusammenzusuchen. Ich habe zudem vorgefertigte Blechteile gekauft, da diese präziser gefertigt sind, als wenn ich diese selbst mit der Bohrmaschine bearbeitet hätte. Grundsätzlich kannst du jedoch fast alle mechanischen Teile der Fräse einzeln kaufen oder selbst herstellen. Du solltest also schrauben und löten können.



**Bild 1.5** Größeres Kaliber: die Shapeoko-T mit Spindeltrieben, MaXYposi-Steuerung und vierter Achse

Warum einige der genannten Anforderungen besonders wichtig sind und miteinander zusammenhängen, werde ich noch genauer darlegen. Kurz gefasst: Je härter das zu bearbeitende Material ist, desto mehr Kräfte werden vom Fräser auf Spindel, Z-Achse, Portal und schließlich X-Achse übertragen. Verbiegt sich die Struktur der Maschine aufgrund dieser Kräfte, wird das Fräsergebnis nicht maßhaltig. Zudem kann nicht beliebig langsam gefräst werden, da sonst die beim Schneiden des Materials entstehende Hitze nicht abgeleitet werden kann.

Deshalb ist in Bezug auf die bearbeitbaren Materialien nicht die Kraft der Motoren der begrenzende Faktor, sondern die Steifigkeit des Maschinengestells (Bild 1.6). Mit Aluprofilen lassen sich die Kräfte beim Fräsen von härteren Metallen nicht mehr im Maschinengestell abfangen. Für eine Fräse, die sauber und zuverlässig Stahl oder dickes Alu bearbeiten kann, ist ein völlig anderer Aufbau notwendig, der speziell angefertigte Teile erfordert, was wiederum die Maschine verteuert. Solche Fräsen liegen im hohen vierstelligen bis fünfstelligen Eurobereich und damit außer Reichweite eines Heimwerkers.



**Bild 1.6** Für die Bearbeitung von Metall werden eine sehr steife Maschine und starke Motoren benötigt. Die Abbildung zeigt die Innenansicht einer DMU 95 monoblock von DMG Mori (© DMG Mori).

Doch degradieren diese Einschränkungen die preiswerten Fräsmaschinen zur „Käsefräse“, die nur Käse schneiden kann und deren Werkstücke „Käse sind“, wie man oft im Internet liest? Ich finde nein. Wer wissen möchte, was man mit einer Fräse und Holz alles anstellen kann, der schaue sich unter anderem einmal auf der Website [www.zenziwerken.de](http://www.zenziwerken.de) oder auf einer Modellbaumesse um, denn die meisten Modellflugzeuge und viele Modellboote werden aus gefrästen Spanten und anderen Holzteilen gefertigt (Bild 1.7). Auch die im Modellbau sehr beliebten Hartschaumplatten lassen sich mit den preiswertesten Fräsen bearbeiten.

Nicht vergessen sollte man die Möglichkeit, Platinen zu gravieren. Das ist eine interessante Alternative zum Ätzen selbst entwickelter Leiterplatten. Gravuren in Acrylglas ergeben sehr schöne, beleuchtbare Schilder. Die Möglichkeiten sind mehr als umfangreich, auch ohne die Bearbeitung von Stahl. Immerhin lassen sich Aluminium und Nichteisenmetalle – wenn auch langsam – bearbeiten.

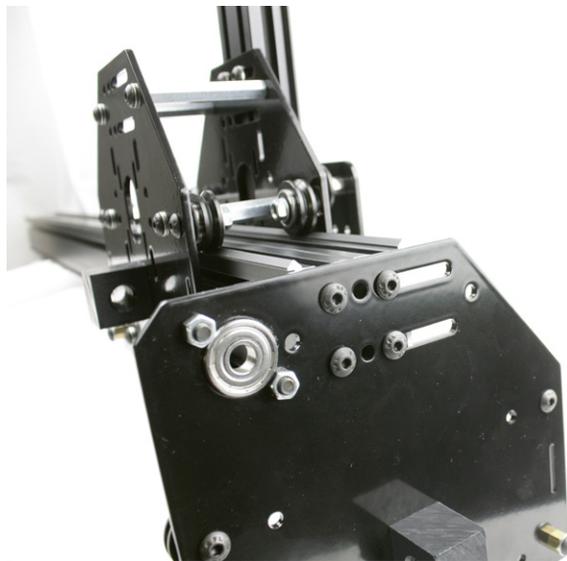
Der Aufbau einer Fräse aus Aluprofilen beschränkt also die Auswahl der Materialien, die man bearbeiten kann, hat aber unschätzbare Vorteile: Die Aluprofile kann man zum einen relativ einfach kaufen, zum anderen lässt sich die Größe der Fräse durch die Länge der Profile individuell an die eigenen Möglichkeiten und Anforderungen anpassen. Ebenso

verhält es sich mit dem Riemetrieb, den die in diesem Buch vorgestellte Fräse (zumindest anfänglich) hat. Auch dieser ermöglicht eine individuelle Größenauswahl.



**Bild 1.7** Mit der „Käsefräse“ lassen sich sehr schöne Projekte, wie diese Schale von ZenziWerken, umsetzen. (© ZenziWerken.de, Daniel Groß)

Wenn du dich in diesen Beschreibungen wiedererkennst und mit den beschriebenen Anforderungen leben kannst, lade ich dich herzlich ein, mir auf dem Weg zur selbst gebauten Fräse zu folgen.



**Bild 1.8** Schritt für Schritt bauen wir eine Fräse auf und nehmen sie in Betrieb.

Noch ein wichtiger Hinweis: Dieses Buch ist nicht als lineare Handlungsanweisung gedacht. Ich baue zunächst eine einfache Maschine mit drei Achsen, Riementrieben, kleinen Motoren und einer einfachen Steuerung und rüste diese dann Schritt für Schritt auf mit einer Absaugung, einem Werkzeuglängentaster, größeren Motoren, einer kräftigeren Steuerung, einer vierten Achse und so weiter. Du kannst die Zwischenschritte natürlich auch überspringen und gleich NEMA23-Motoren einbauen.

Dieses Buch wird dir auch ein nützlicher Wegweiser sein, wenn du dich nicht für eine Shapeoko-Grundmaschine, sondern einen anderen Bausatz entschieden hast. Die Ausführungen zur elektrischen/elektronischen Ausstattung sind auch für ein anderes mechanisches Basisset gültig. Lies das Buch am besten einmal komplett durch, bevor du dich für einen Aufbau entscheidest. Ich liefere an vielen Stellen Pros und Contras und begründe meine Entscheidungen ausführlich. So kannst du meinen Argumenten folgen – oder eben auch nicht.

## ■ 1.2 Von der Idee zum Span: Wie ist dieses Buch aufgebaut?

Nach dieser Einführung folgen in Kapitel 2 der Aufbau der Fräsmaschine, die Beschreibung ihrer Bestandteile und einige Begriffserklärungen. In Kapitel 2 wird zudem die notwendige Größe und das Budget geklärt, das für die Fräsmaschine und ihre Peripherie ausgegeben werden soll. Auch sinnvolle Erweiterungen und Ergänzungen werden besprochen.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit den Grundlagen des Fräsens. Welche Werkzeuge gibt es, wie werden diese eingesetzt, was bedeutet Vorschub, Zustellung und Schnittgeschwindigkeit, wie wählt man die richtigen Parameter für verschiedene Werkstoffe und Werkzeuge aus? Einen Schritt weiter geht es mit den Bearbeitungsstrategien. Es werden verschiedene Möglichkeiten vorgestellt, Material abzutragen, die jeweils Vor- und Nachteile haben. Wozu Maschinen-, Werkstück-, Programm- und andere Nullpunkte und ihre zugehörigen Koordinatensysteme gut sind und wie man mit ihnen arbeitet, ist ebenfalls Thema in Kapitel 3.

Dann folgt das kurze Kapitel 4, in dem ich den endgültigen Aufbau und die Größe der Fräse festlege und die zum Bau notwendigen Bestandteile zusammenstelle.

In Kapitel 5 und 6 gehe ich auf den mechanischen und elektrischen Zusammenbau der Fräsmaschine ein. Der Aufbau wird nicht bis zur letzten Schraube dargestellt, da dein individueller Baukasten je nach Anforderung sicherlich etwas anders aussieht, doch die Kapitel enthalten viele Tipps und Tricks, die dir helfen, Fehler beim Zusammenbau zu

vermeiden. Darüber hinaus wird in Kapitel 6 die Maschinensoftware auf den Steuerungsrechner gespielt und die Maschinensteuerung selbst initialisiert.

In Kapitel 7 kommen wir zum spannendsten Teil: der Inbetriebnahme der Fräse. Die Maschine macht die ersten Bewegungen, wir suchen Nullpunkte, spannen ein Werkstück auf und erzeugen das erste Mal Späne. Ganz wichtig ist auch Abschnitt 7.5 zum Thema Sicherheit. Sowohl der Bau als auch der Betrieb der Fräse bergen Gefahren in sich, wenn nicht gewisse Vorsichtsmaßnahmen ergriffen werden.

In Kapitel 8 wird der gesamte Workflow, der in Kapitel 2 bereits in der Theorie vorgestellt wurde, noch einmal detailliert betrachtet. Wir arbeiten mit Estlcam und Autodesk Fusion 360 verschiedene Projekte durch – von der Skizze über das 3D-Modell bis hin zur CAM-Programmierung, der G-Codeausgabe und dem Fräsvorgang auf der selbst gebauten Maschine.



**Bild 1.9** Auch das Gravieren gescannter Zeichnungen bringen wir der Fräse bei.



**HINWEIS:** Bitte vergiss nicht, dass das Bedienen einer Fräse im Rahmen eines Lehrberufs erlernt wird. Zerspanungsmechaniker lernen dreieinhalb Jahre lang alles über Fertigungsmethoden und -prozesse. Auch du wirst – wenn du nicht die entsprechende Ausbildung hast – einige Zeit brauchen, um deine Fräse wirklich im Griff zu haben. Das Verstehen der Fräseparameter und des Workflows ist extrem wichtig, wenn du Erfolgserlebnisse statt Frust erfahren möchtest.

In Kapitel 9 werden der Werkzeugwechsel und der dafür notwendige Werkzeuglängensensor behandelt. Zudem bauen wir eine Späneabsaugung auf Basis eines Zyklonabscheiders, die über das NC-Programm gesteuert wird (Bild 1.10).

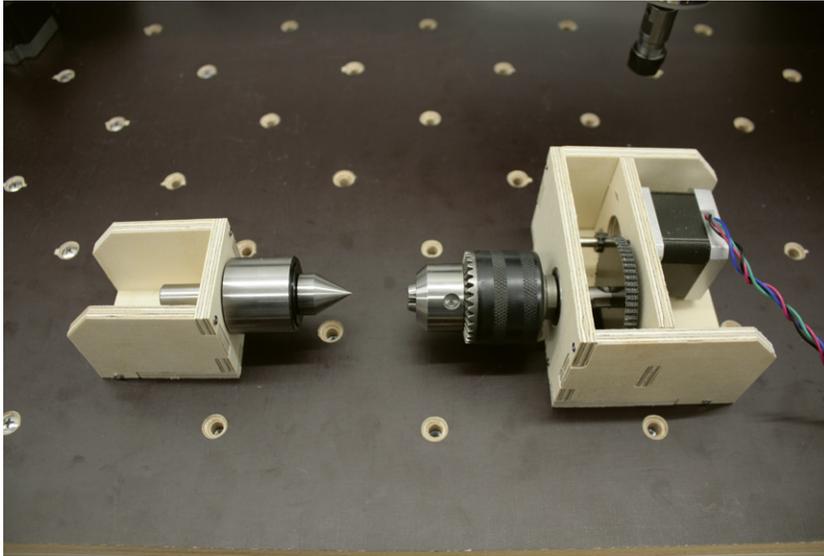


**Bild 1.10** Sorgt für Sauberkeit am Arbeitsplatz: ein selbst gebauter Zyklonabscheider

Der Maker ist ja nie zufrieden, wenn etwas einfach nur funktioniert. Hatten wir die CNC-Maschine zunächst mit Komponenten ausgestattet, wie sie im 3D-Druckbereich typisch sind – mit Raspberry Pi, Polulu 8825-Treibern und NEMA17-Motoren –, greifen wir in Kapitel 10 zu Treiberplatinen, die zum einen NEMA23-Motoren treiben können und zum anderen Reserven für eine vierte Achse bieten. Außerdem wird der Maker nervös, wenn die Möglichkeiten der Elektronik nicht voll ausgeschöpft werden. Also bauen wir in Kapitel 10 eine vierte Achse, um Werkstücke von (fast) allen Seiten bearbeiten zu können (Bild 1.11).

Die optionalen Ergänzungen bauen nicht direkt aufeinander auf. Du kannst also die Späneabsaugung auch nachbauen, wenn du nicht auf Spindeltriebe umgerüstet hast, oder die Maschine gleich mit einer leistungsstärkeren Steuerung aufbauen, ohne zunächst mit dem Raspberry Pi zu arbeiten.

Am Ende wirst du eine leistungsstarke, vielseitige CNC-Fräsmaschine gebaut haben, die dir bei deinen Fräsprojekten hoffentlich wertvolle Dienste leisten wird und auch als Basis für einen Lasercutter dienen kann.



**Bild 1.11** Die vierte Achse erschließt uns neue Möglichkeiten beim Fräsen.

## ■ 1.3 Danksagungen

Solch ein Buch schreibt sich nicht von alleine, insbesondere deshalb, weil man extrem viel Hardware für die Realisierung benötigt. Folgende Firmen und Personen haben mich mit Rat und Tat bzw. verschiedener Hardware unterstützt:

- Allen voran danke ich Ronald Holze von myhobby-CNC (<http://www.myhobby-cnc.de>), der mir eine fast komplette „Zweitfräse“ zur Verfügung gestellt hat.
- Ich danke den Firmen Protoneer und Heise Medien, die mich mit ihren Steuerungen Raspberry Pi CNC und MaXYposi Controller ausgestattet haben. Peter König von der Zeitschrift Make: und dem MaXYposi-Entwickler Carsten Meyer danke ich für ihre Unterstützung.
- Daniel Groß von ZenziWerken.de ([www.zenziwerken.de](http://www.zenziwerken.de)) danke ich für die Erlaubnis, seine Konstruktionen und schönen Bilder zu nutzen.
- Der Estlcam-Entwickler Christian Knüll hat mir einige wichtige Fragen zu seiner CAM-Software beantwortet und mich vor einem großen Irrtum bewahrt.
- Michael Haase danke ich für die Daten seines Balsa-Zagi-Nurflüglermodells, das in Kapitel 8 zum Einsatz kommt.

- Und zum Schluss danke ich meiner Familie, meinen Kunden und Julia Stepp vom Hanser Verlag für ihre Geduld bei diesem Projekt.

Doch nun genug der Vorrede. Bist du bereit, in die spannende Welt des CNC-Fräsens abzutauschen? Dann lass uns loslegen. Ich wünsche dir viel Freude bei der Lektüre meines Buches!

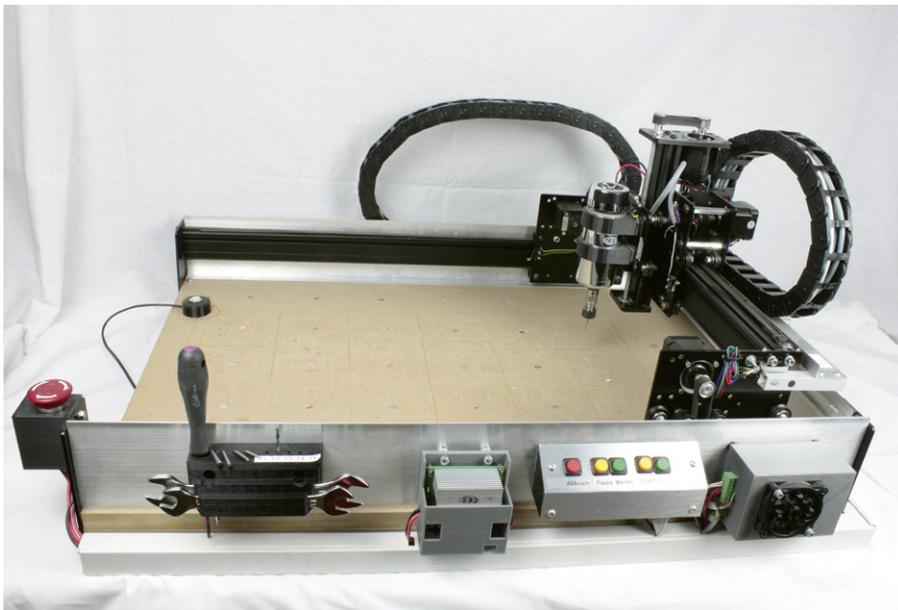
Friedrichshafen, Januar 2022

*Ralf Steck*

# 2

## Schnelleinstieg in die Welt der CNC-Fräsen: Aufbau, Funktionsweise und Marktübersicht

In diesem Kapitel beschreibe ich zunächst, wie aus 3D-CAD-Daten die Bewegungsbefehle für die Motoren einer Fräse entstehen. Dann lernst du die Bestandteile einer Fräsmaschine kennen – von der Steuerung über die Motoren bis zu den Achsen und der Spindel. Als Nächstes wenden wir uns den Werkstücken zu. Welche Formen lassen sich mit einer Fräse überhaupt herstellen? Was ist 2,5D- und was 3-Achs-Fräsen? Warum brauche ich für 3D-Fräsen fünf Achsen? Weiter geht es mit den verschiedenen Werkstoffen, den Grenzen der hier beschriebenen CNC-Maschine bei der Materialwahl und schließlich mit der konkreten Auswahl der im Buch eingesetzten Fräsmaschine, deren Größe und der Festlegung des Budgets (Bild 2.1, siehe auch Abschnitt 2.5 und Abschnitt 2.6.10). Schließlich kümmern wir uns um die Peripherie. Was benötigt man außer der Maschine und ihrer Steuerung? Was bringen Späneabsaugung, Werkzeuglängentaster oder vierte Achse?



**Bild 2.1** Im Buch bauen wir eine Shapeoko-Fräse.

## ■ 2.1 Von CAD zu CNC: Der Datenworkflow

Alle CNC-Maschinen, seien es Fräsen, Drehmaschinen oder auch 3D-Drucker, werden mit G-Code gesteuert. Das ist eine in der Norm DIN 66025/ISO 6983 festgelegte Programmiersprache, die allerdings bei jeder Maschine und jedem Hersteller über die genormten Befehle hinaus erweitert und angepasst ist. Das ist zum einen darauf zurückzuführen, dass sich die Anlagen schneller entwickeln als die Norm. Auf diese Weise können die Befehle für die neuen Funktionen erweitert werden. Zum anderen haben die verschiedenen Anlagen unterschiedliche Spezialfunktionen, die mit jeweils speziellen Befehlen angesprochen werden. So benötigt ein 3D-Drucker Befehle, mit denen man die Temperatur von Düse und Bett festlegen kann, eine Fräsmaschine arbeitet dagegen mit Kühlschmiermittel, dessen Fluss ebenfalls im Code gesteuert werden muss. Praktisch jede Herstellerfirma pflegt deshalb einen spezifischen G-Code-Dialekt, der die eigenen Funktionen unterstützt. Der G-Code muss deswegen immer an die jeweilige Maschine, die zum Einsatz kommen soll, beziehungsweise an deren Steuerung angepasst werden.

Nichtsdestotrotz gibt es eine Reihe allgemeingültiger Befehle wie G0 („Bewege das Werkzeug im Eilgang und in gerader Linie zu bestimmten Koordinaten“) oder G2 („Beschreibe einen Kreisbogen im Uhrzeigersinn“). Bewegungsbefehle beginnen mit dem Buchstaben G, M-Codes steuern weitere Funktionen wie die Spindeldrehzahl (M4) oder Kühlung (M8). Die Codes akzeptieren Parameter. So startet G1 X50 Y20 Z-0,5 F1500 eine lineare Bewegung zu den XYZ-Koordinaten 50/20/-0,5 mit einer Geschwindigkeit von 1500 Millimetern pro Minute. Durch weitere Befehle lässt sich auch einstellen, ob die Koordinatenwerte relativ zum aktuellen Standort (relativ) oder relativ zum Nullpunkt (absolut) gemeint sind.



**TIPP:** Ein ; bewirkt, dass der Rest der Zeile ignoriert wird. So kann man Kommentare einfügen. Zudem lassen sich Zeilennummern einfügen, die sich in Unterprogrammen referenzieren lassen.

Ein G-Code-Programm, das ein einfaches Quadrat mit 50 Millimeter Kantenlänge abfährt, könnte also folgendermaßen aussehen:

```
N10 G21 ; Einheiten auf Millimeter setzen
N20 G90 ; auf Absolutpositionierung umschalten
N30 G0 X20 Y20 Z0 ; Linear auf die genannten Absolutkoordinaten verfahren
N40 G91 ; Auf Relativpositionierung umschalten
N50 M3 S12000 ; Spindel im Uhrzeigersinn mit 12000 U/min anschalten
N60 G1 Z-0.5 ; 0,5 Millimeter in das Material eintauchen
N70 G1 X50 ; Mit Bearbeitungsgeschwindigkeit um 50 Millimeter in X-Richtung
verfahren
N80 G1 Y50 ; Mit Bearbeitungsgeschwindigkeit um 50 Millimeter in Y-Richtung
verfahren
N90 G1 X-50 ; Mit Bearbeitungsgeschwindigkeit um 50 Millimeter in negativer
X-Richtung verfahren
```

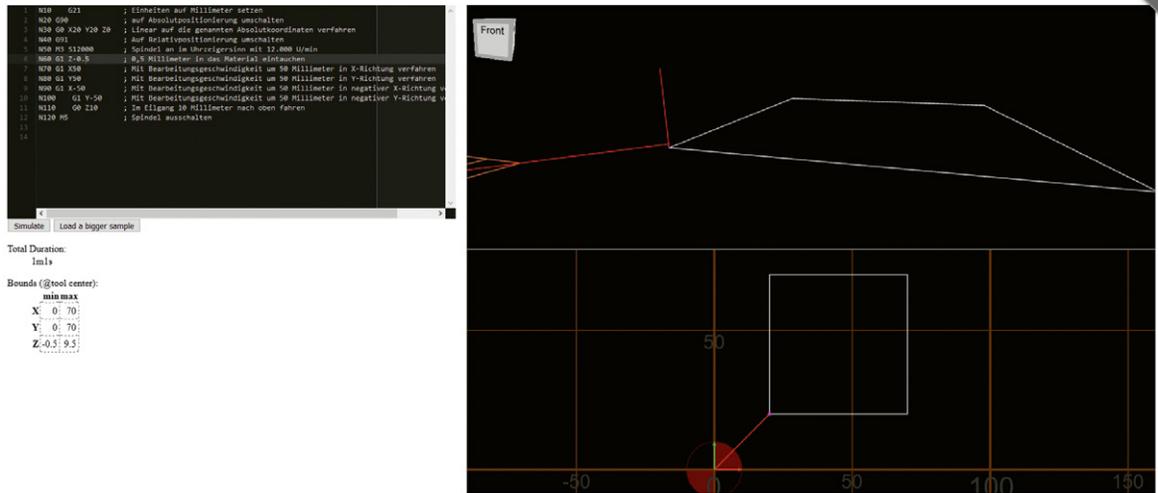
```

N100 G1 Y-50 ; Mit Bearbeitungsgeschwindigkeit um 50 Millimeter in negativer
Y-Richtung verfahren
N110 G0 Z10 ; Im Eilgang 10 Millimeter nach oben fahren
N120 M5 ; Spindel ausschalten

```

### G-Code Q'n'dirty toolpath simulator

Paste your g-code in the left-hand window and see the preview of your tool path on the right.  
The right-hand pane are interactive, drag them to change the point of view.



**Bild 2.2** Mithilfe eines G-Code-Onlinesimulators (<http://nraynaud.github.io/webgcode>) visualisieren wir schnell den vorangehend dargestellten Code.

Als die ersten CNC-Maschinen auf den Markt kamen, wurde der G-Code noch manuell geschrieben. Das war allerdings sehr fehleranfällig, besonders, weil die Werkzeugbahnen nur selten dem entsprechen, was man auf der Zeichnung sieht, denn der Fräser schneidet nicht mit seiner Mittelachse, sondern mit seiner Seitenfläche. Das bedeutet, dass im vorangegangenen Beispiel kein Quadrat mit 50 Millimeter Kantenlänge stehen bleiben würde, sondern bei Verwendung eines 6-Millimeter-Schaftfräasers ein Quadrat mit 44 Millimeter Kantenlänge. Der 6-Millimeter-Schaftfräser arbeitet 3 Millimeter neben der Mittellinie.

Das Programm müsste in diesem Fall so aussehen (Ausschnitt):

```

[...]
N30 G0 X17 Y17 Z0 ; Linear auf die genannten Absolutkoordinaten verfahren
N40 G91 ; Auf Relativpositionierung umschalten
N50 G1 Z-0.5 ; 0,5 Millimeter in das Material eintauchen
N60 G1 X56 ; Mit Bearbeitungsgeschwindigkeit um 50 Millimeter in X-Richtung
verfahren
N70 G1 Y56 ; Mit Bearbeitungsgeschwindigkeit um 50 Millimeter in Y-Richtung
verfahren
N80 G1 X-56 ; Mit Bearbeitungsgeschwindigkeit um 50 Millimeter in negativer
X-Richtung verfahren
N90 G1 Y-56 ; Mit Bearbeitungsgeschwindigkeit um 50 Millimeter in negativer
Y-Richtung verfahren
N100 G0 Z10 ; Im Eilgang 10 Millimeter nach oben fahren

```

## G-Code Q'n'dirty toolpath simulator

Paste your g-code in the left-hand window and see the preview of your tool path on the right.  
The right-hand pane are interactive, drag them to change the point of view.

```

N10 G21 ; Linieneinheit auf Millimeter setzen
N20 G90 ; auf Absolutpositionierung umschalten
N30 G0 X17 Y17 Z0 ; linear auf die genannten Absolutkoordinaten vorfahren
N40 M01 ; auf Haltpositionierung umschalten
N50 G1 Z-0.5 ; 0,5 Millimeter in das Material einfräsen
N60 G1 X56 ; Mit Bearbeitungsgeschwindigkeit um 50 Millimeter in X-Richtung vorfahren
N70 G1 Y56 ; Mit Bearbeitungsgeschwindigkeit um 50 Millimeter in Y-Richtung vorfahren
N80 G1 X-56 ; Mit Bearbeitungsgeschwindigkeit um 50 Millimeter in negativer X-Richtung vorfahren
N90 G1 Y-56 ; Mit Bearbeitungsgeschwindigkeit um 50 Millimeter in negativer Y-Richtung vorfahren
N100 G0 Z10 ; in 10 Millimeter nach oben fahren
N110 G0 Z10 ; in 10 Millimeter nach oben fahren
N120 M02 ; Spindel ausschalten
  
```

Total Duration:  
1m5s

Bounds (@tool center):  
min max  
X: 0 73  
Y: 0 73  
Z: -0.5 19.5

**Bild 2.3** Die Simulation zeigt im unteren Fenster die etwas weiter außen verlaufende Werkzeugbahn.

Auf diese Weise verläuft die Mittellinie der Bewegung um 3 Millimeter nach außen versetzt und es bleibt ein Quadrat mit 50 Millimeter Kantenlänge stehen. Bei komplexen Formen wird es schnell fast unmöglich, diese sogenannte Fräserradiuskorrektur manuell durchzuführen. Deshalb wurde diese Korrektur bald in die Maschinensteuerung verlegt und der Programmierer konnte wieder mit den tatsächlichen Maßen des Werkstücks arbeiten.

Die entsprechenden G-Befehle lauten G40, G41 und G42. G40 schaltet die Fräserradiuskorrektur aus, G41 verlegt die Werkzeugbahn in Vorschubrichtung gesehen nach links und G42 nach rechts. Der Parameter D bestimmt den Werkzeugdurchmesser oder bei manchen Steuerungen ein Werkzeug im Wechsler, dessen Durchmesser wiederum in einer Werkzeugmaßtabelle hinterlegt ist.

Die Zeile

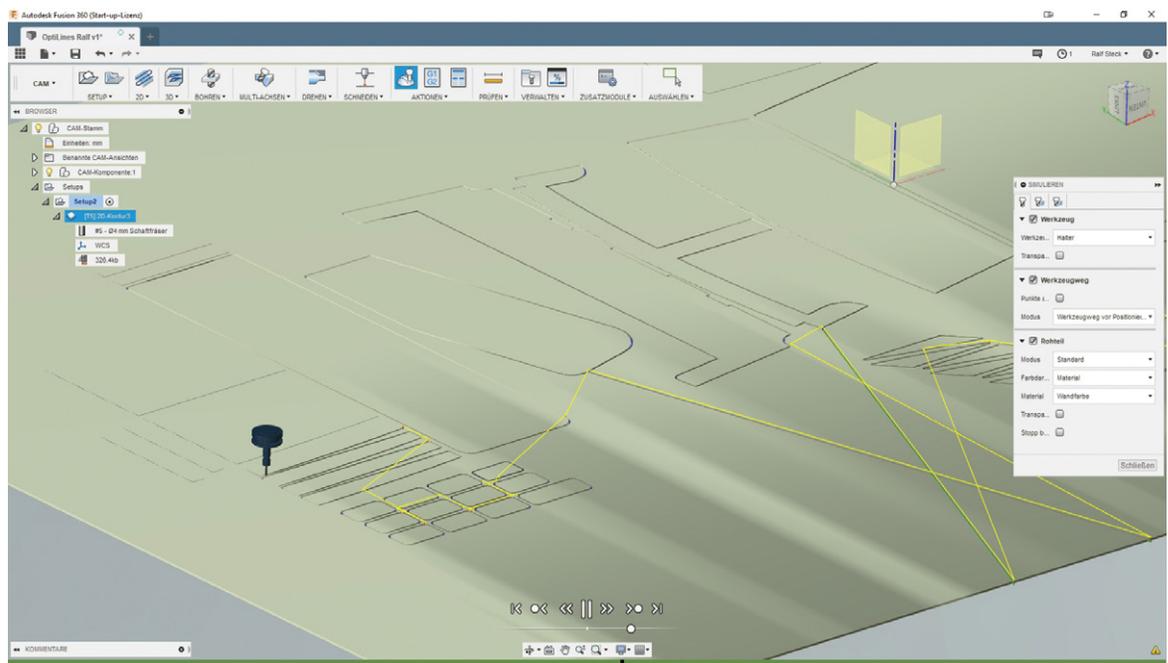
```
N25 G42 D3 ; Fräserradiuskorrektur rechts, 3 Millimeter Abstand
```

würde, an entsprechender Stelle (zwischen Zeile 20 und 30) in das erste Programm eingefügt, den Werkzeugweg so verschieben, dass ein Quadrat mit 50 Millimeter Kantenlänge entsteht.

Doch das soll zur manuellen Programmierung genügen. Das Beispiel hat, glaube ich, gut gezeigt, dass diese Art der Maschinenprogrammierung schnell sehr aufwendig wird. Man stelle sich vor, das bahnenweise Abfahren einer Fläche von Hand programmieren zu müssen – Welch ein Aufwand! Zum Glück gibt es heutzutage CAM-Software (Computer-Aided Manufacturing), die aus einer Geometrie die benötigten G-Codes ableitet. Das bedeutet jedoch, dass wir eine digitale Darstellung des endgültigen Bauteils benötigen. Je nachdem,

wie wir dieses bearbeiten möchten, reicht dazu eine Strichzeichnung, wenn mit festen Tiefenwerten gearbeitet wird, oder es ist ein 3D-Modell notwendig, wenn gebogene Flächen erzeugt werden sollen. So reicht für das Fräsen von Spanten oder das Gravieren eines Logos in eine Plexiglasplatte eine Vektorgrafikdatei, beispielsweise im DXF- oder SVG-Format. Wenn du hingegen ein Geländemodell fräsen möchtest, brauchst du ein dreidimensionales Modell.

In diesem Buch werden wir die Software Fusion 360 von Autodesk benutzen, die unter anderem ein 3D-CAD-System mit einem CAM-System verbindet (Bild 2.4). CAM-Systeme wie Estlcam, Mach4 oder im Profibereich Tebis nehmen 2D-/3D-Daten entgegen und liefern den zugehörigen G-Code. Damit die CAM-Software den richtigen G-Code-Dialekt für die Steuerung der CNC-Maschine erzeugt, benötigt sie einen angepassten Postprozessor (PP). Fusion 360 enthält zum Glück neben Postprozessoren für Profimaschinen auch PPs für Mach4, Shapeokos und GRBL, sodass wir den passenden Code erzeugen können.



**Bild 2.4** Mit dem für Privatanwender kostenlosen Fusion 360 erstellen wir die Fräsbahndaten.

Die Steuerung der Maschine nimmt den G-Code entgegen und wandelt ihn in die Steuerimpulse für die Endstufen der Schrittmotoren und der Spindel um. Zusätzlich besitzt sie Ausgänge, beispielsweise für das Ein- und Ausschalten einer Kühlung. Auf diesen Teil des Workflows gehe ich in Kapitel 7 ein. Ich habe die Softwarekomponenten der Steuerung trotzdem in den Workflow aus Tabelle 2.1 aufgenommen, um den Signalfluss zu verdeutlichen.

**Tabelle 2.1** Datenfluss und zugehörige Softwarekomponenten

Komponente	Funktion	Beispiel
CAD-System	Erstellen des 2D- oder 3D-Modells	Fusion 360, FreeCad, SketchUp, SolidWorks
CAM-System	Definieren der Bearbeitungsschritte und -strategien, der Werkzeuge und des Rohteils; Erzeugen des CNC-Programms	Fusion 360, Mach4, Estlcam
Postprozessor	Erzeugen des zur Maschine passenden G-Code-Dialekts	In die CAM-Software integriert
G-Code-Sender	Liefert das Programm zeilenweise an die Steuerung; läuft auf PC oder Raspberry Pi	Mach4, Estlcam, GRBL-Sender, bCNC, CNC.js
G-Code-Interpreter	Interpretiert den G-Code und wandelt ihn in Steuersignale für die Motorendstufen um; läuft auf Arduino oder PC (Echtzeit)	GRBL, Estlcam-Firmware für Arduino, Mach4

## ■ 2.2 Bestandteile einer CNC-Fräsmaschine

Die Schnittstelle zwischen Programmierung und CNC-Maschine ist der G-Code, der wie in Abschnitt 2.1 beschrieben im CAM-System erzeugt und nun an die Steuerung übergeben wird. Man wird sinnvollerweise einen eigenständigen PC als Steuerungsrechner benutzen, während Konstruktion und CAM-Programmierung auf einem anderen Rechner laufen. Zumindest ist dies die übliche Trennung, wie sie auch im Profibereich gelebt wird. Die Trennung ist allerdings im Profi- wie im Hobbybereich unscharf, denn auch im Profibereich kann der Maschinenbediener auf der Maschinensteuerung eigene CNC-Programme schreiben oder die Programme aus dem CAM-System bearbeiten. Ebenso gut kann die Steuerung auch in die CAM-Software integriert sein und auf einem PC unter Windows laufen (beispielsweise bei Mach4) oder auf einem Steuerungs-PC den von einem CAM-Programm gelieferten G-Code verarbeiten, wie bei LinuxCNC.

### 2.2.1 Kommandosache: Die Steuerung

Die Steuerung muss allerdings echtzeitfähig sein. Das bedeutet, dass die Signale der Maschine – beispielsweise von Endschaltern – in Realzeit verarbeitet werden. Ebenso müssen die Steuersignale an die Schrittmotoren beziehungsweise deren Endstufen im

Millisekundenbereich zuverlässig und ohne Zeitverzögerung weitergeleitet werden. Serielle und USB-Anschlüsse liefern und senden Daten nacheinander und sind deshalb wenig geeignet für die direkte Steuerung einer CNC-Maschine. Viele Steuerungen nutzen bis heute den Parallelport, der früher auf sehr einfache Weise echtzeitfähige und gleichzeitig nutzbare Ein- und Ausgänge zur Verfügung stellte. Rechner mit Parallelport sterben allerdings langsam aus. Zudem erlaubt beispielsweise Windows 10 keinen direkten Zugriff von Software auf die Schnittstellen mehr. Echtzeitverarbeitung ist damit nicht mehr gewährleistet. Jeder kennt die kleinen „Denkpausen“, die Windows immer wieder einlegt. Beim Steuern einer CNC-Maschine sind solche Denkpausen nicht tolerierbar. Nicht zuletzt können die Energiesparfunktionen von Windows für Ärger sorgen, wenn sie den Rechner nach einiger Zeit mitten während des Fräsens in den Tiefschlaf schicken.

Im Parallelport-Bereich werden sogenannte Breakout-Boards (BOB) genutzt. Diese stellen eine rein elektrische Umsetzung zwischen Parallelport und den Anschlüssen der Endstufen her. Die gesamte Intelligenz steckt also im PC. Ab dem Parallelport des Rechners laufen die Signale direkt über das Breakout-Board und die Endstufe in den jeweiligen Motor. Sehr elegant und weniger empfindlich gegen Einflüsse des PC-Betriebssystems ist dagegen die Lösung, die Steuerung und das Umsetzen der G-Codes in Maschinenbefehle einem darauf spezialisierten Mikrocontroller zu überlassen. Dazu lassen sich beispielsweise die sehr preiswerten Arduinos verwenden. Auf dem Arduino läuft eine spezielle Firmware, beispielsweise GRBL, die G-Code versteht. Das ist die „offizielle“ Shapeoko-Lösung, die auch wir nutzen werden. Estlcam geht einen Sonderweg mit einer eigenen Arduino-Firmware, die direkt aus Estlcam mit Befehlen versorgt wird.

Diese Echtzeitsteuerung auf dem Arduino ist allerdings erst die halbe Miete, denn sie muss ständig und in der richtigen Geschwindigkeit mit G-Code versorgt werden – Zeile für Zeile in dem Takt, wie die Fräse die Befehle abarbeitet. Man benötigt also einen Rechner zum „Füttern“ des Arduino. Man kann dafür wie bei der „direkten“ Lösung einen Laptop oder PC benutzen. Ich habe mich für meine erste Fräse hingegen für eine Lösung auf Basis des Kleinstrechners Raspberry Pi entschieden. Der Raspberry kostet unter 40 Euro, benötigt praktisch keinen Strom und stellt mithilfe von Software wie bCNC eine Bedienoberfläche für die Fräse bereit, bei der „Profimaschinen-Feeling“ aufkommt. bCNC ist gleichzeitig ein G-Code-Sender, der die G-Codes an den Arduino sendet. Außerdem kann man in bCNC einfache Programme selbst erstellen (Bild 2.5). Raspberry und Arduino bilden also zusammen eine komplette Steuerung mit CAM-Funktionalität. Wir werden im Verlauf des Buches noch andere Optionen zur Steuerung, auch über einen Laptop, einsetzen, sodass du alle Möglichkeiten kennenlernst.