

#makers
DO IT.



Ralf Steck

CNC- FRÄSEN für Maker

2. Auflage



Baue, programmiere und steuere
deine DIY-Fräse

HANSER

HANSER

Ralf Steck

CNC-Fräsen für Maker

Baue, programmiere und steuere deine DIY-Fräse

2., aktualisierte Auflage

**Ihr Plus – digitale
Zusatzinhalte!**

Auf unserem Download-Portal
finden Sie zu diesem Titel
kostenloses Zusatzmaterial.

Geben Sie auf [plus.hanser-
fachbuch.de](https://plus.hanser-fachbuch.de) einfach diesen
Code ein:

plus-AE2hc-ktP6F

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
Lektorat: Julia Stepp
Herstellung: Melanie Zinsler
Coverrealisierung: Max Kostopoulos
Titelillustration: © ZenziWerken.de, Daniel Groß

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

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

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

Inhaltsverzeichnis

Titelei

Impressum

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung

1.1 An wen richtet sich dieses Buch?

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

1.3 Danksagungen

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

2.1 Von CAD zu CNC: Der Datenworkflow

2.2 Bestandteile einer CNC-Fräsmaschine

2.2.1 Kommandosache: Die Steuerung

2.2.2 Antreiber: Die Motorenendstufen

2.2.3 Einer nach dem anderen: Die Schrittmotoren

2.2.4 Immer geradeaus: Die Achsführungen

2.2.5 Vorwärtsdrang: Die Achsantriebe

2.2.6 Es geht rund: Die Spindel

2.2.7 Basis für alles: Die Arbeitsplatte

2.3 Von Achsen und Dimensionen: Was kann eine Fräsmaschine leisten?

2.4 Es ist nicht alles Käse! Der Einsatz von Werkstoffen

2.5 Shapeoko – die im Buch eingesetzte CNC-Fräse

2.6 Hobby-Fräsmaschinen: Eine kleine Marktübersicht

2.6.1 „Chinafräsen“

2.6.2 BZT

2.6.3 GoCNC

2.6.4 Proxxon

[2.6.5 Shaper Origin](#)

[2.6.6 Sorotec](#)

[2.6.7 Stepcraft](#)

[2.6.8 MechaPlus](#)

[2.6.9 EMS Möderl](#)

[2.6.10 Shapeoko](#)

[2.7 Rund um die Maschine: Peripherie und Zubehör](#)

[2.7.1 Hiergeblieben! Werkstückbefestigung](#)

[2.7.2 Saubermann: Die Späneabsaugung](#)

[2.7.3 Wo bist du? Der Werkzeuglängensensor](#)

[2.7.4 Alles im Kasten: Das Gehäuse](#)

[2.7.5 Jetzt geht's rund! Die vierte Achse](#)

[3 Gedankenspiele: Die Grundlagen des Fräsens](#)

[3.1 Welcher Fräser ist für welchen Einsatz geeignet?](#)

[3.2 Schnittwerte: Bitte die Richtgeschwindigkeit beachten!](#)

3.3 Routenplanung: Die richtige Frässtrategie

3.3.1 Hü oder hott: Gegen- und Gleichlaufräsen

3.3.2 Schruppen, Schlichten und Restmaterial

3.3.3 Die richtige Frässtrategie für verschiedene Anwendungen

3.4 Nullpunkte: Wo bin ich und wer bin ich?

4 Vor dem Fräsenbau: Kauf- und Bauvorbereitungen

4.1 Wie groß soll die Fräse werden?

4.2 Wer liefert was? Bauteile und Bezugsquellen

4.3 Die Kostenfrage: Bestelllisten und Preise

4.4 Werkzeug und Zubehör: Was braucht es noch?

5 Endlich schrauben! Der mechanische Aufbau der Fräse

5.1 Rolling, rolling, rolling: Die Kleinteile

5.2 Auf und ab: Die Z-Achse

5.3 Hin und her: Der X-Schlitten

5.4 Brückenbau: Das X-Portal

5.5 Am Boden: Die Y-Achse

5.6 Exkurs: Fräsen einer Arbeitsplatte mit Shaper Origin

5.6.1 Shaper Origin – die handgeführte CNC-Fräse

5.6.2 Erste Erfahrungen mit CAD: Der Arbeitstisch entsteht in Fusion 360

6 Der Lötkolben glüht! Aufbau der Fräselektronik und -steuerung

6.1 Verbindendes und Trennendes: Leitungen und Schalter

6.2 Gute Führung: Verlegung der Leitungen und Anschluss der Steuerung

6.3 Das Gehirn der Fräse: Der Steuerrechner

6.4 Erstkontakt: Verbinden von bCNC mit GRBL

7 Jetzt wird es ernst! Die Inbetriebnahme der Fräse

7.1 Richtungsweisend: GRBL richtig einstellen

7.2 Oberflächlich: Erste Schritte in bCNC

7.3 Späne fliegen: Das erste Fräsprojekt

7.4 Fixiert: Haltestege einplanen hilft gegen Projektile

7.5 Sicher ist sicher: Sicherheit an der Maschine

8 Von der Vision zur Realität: Der CAD-CAM-NC-Workflow

8.1 Estlcam: CAM/CNC-Software made in Germany

8.2 Zeichen setzen: Gravieren mit Estlcam

8.3 Da schau her! G-Codedateien lesen

8.4 Tiefschürfend: Vorgegebene Daten fräsen

8.5 Die Späne fliegen: Tipps zur Arbeit an der Fräse

8.6 Hoch hinaus! Fräsen eines Flugzeug-Spantengerüsts

8.7 3-Achs-Fräsen: In alle Richtungen

8.8 CAD/CAM vereint: Ein komplett in Fusion 360 realisiertes Projekt

9 Optimierungswahn: Diverse Fräsen-Upgrades und -ergänzungen

9.1 Fiat Lux! Es werde Licht im Arbeitsraum

9.2 Grenzen setzen: Abdeckbleche und Kabelführung

9.3 Messgerät: Der Werkzeuglängentaster

9.4 Sauber, sauber: Die Absaugung

9.5 CNC-Staubsaugen: Die Absaugung über G-Code steuern

10 Die Kür: 4-Achs-Steuerung und vierte Achse

10.1 Getrennt und doch gemeinsam: Der Aufbau der Steuerung

10.2 Spekulativ: Die Hardware für die vierte Achse

10.3 Drehwurm: Fräsen mit der Drehachse

11 Am Endschalter: Fazit und Ausblick

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.

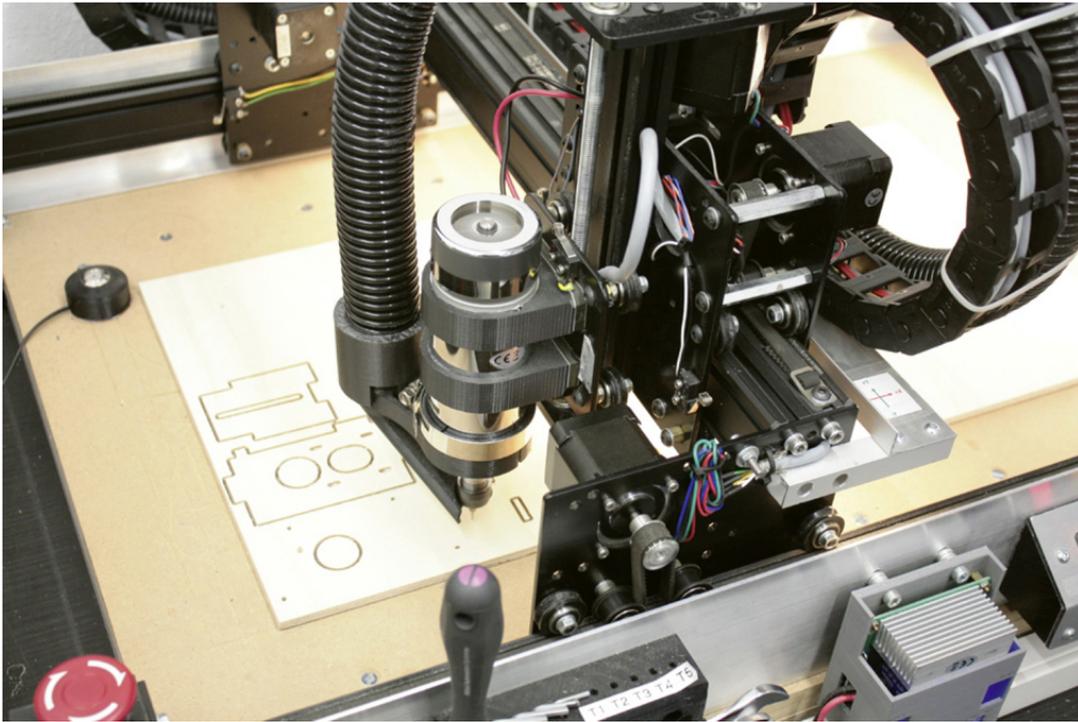


Bild 1.1 Mit einer CNC-Fräse lassen sich die unterschiedlichsten Dinge erstellen. Hier entstehen die Holzteile für die vierte Achse.

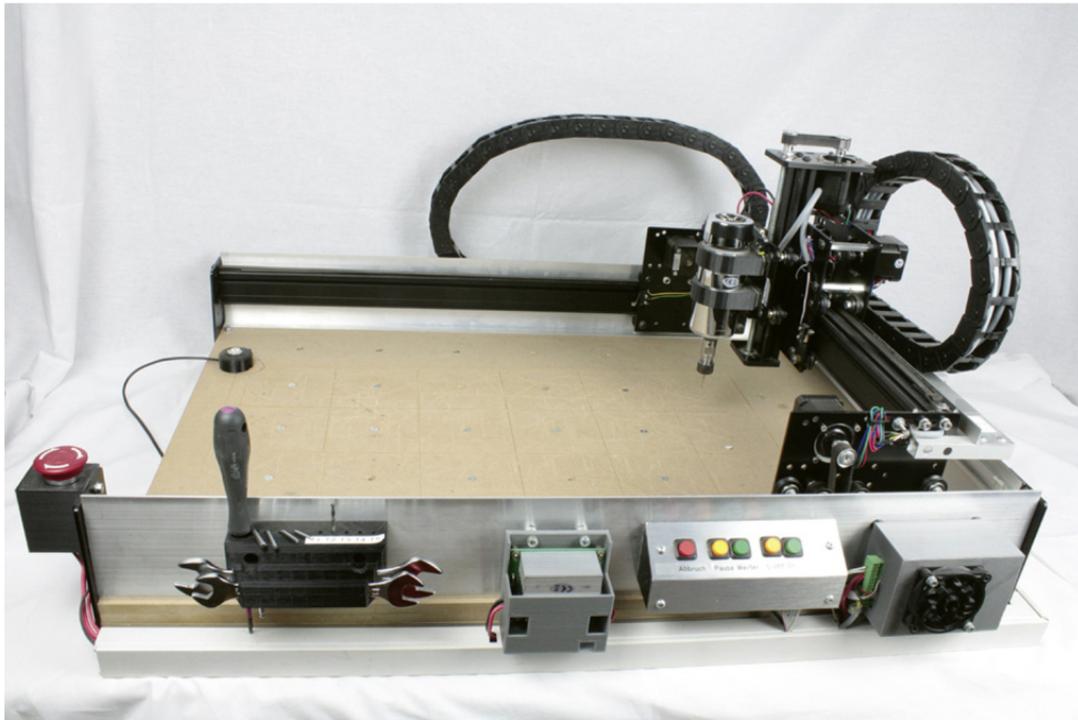


Bild 1.2 Was man für etwa 1000 Euro bekommt: eine Shapeoko-X-Fräse

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 978-3-44645681-5) empfehlen, in dem ich detailliert in die 3D-Modellierung einführe ([Bild 1.3](#)).

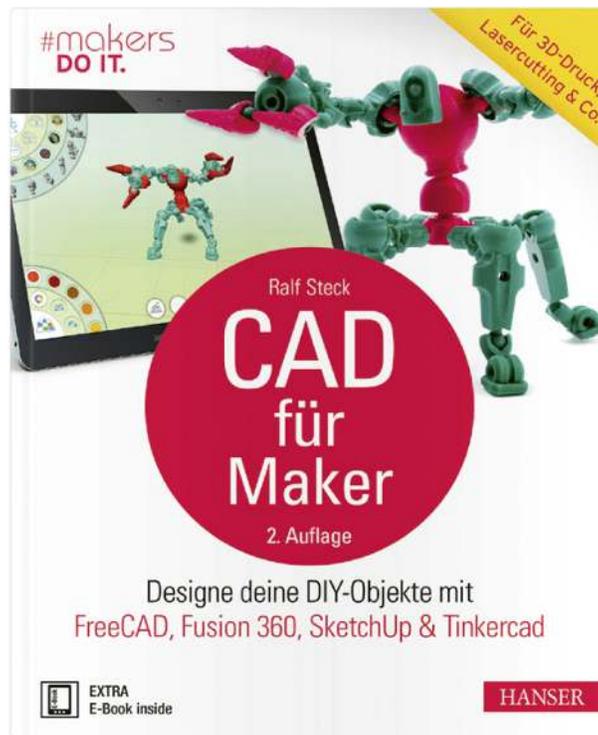


Bild 1.3 Mein Buch *CAD für Maker* enthält Anleitungen zur 3D-Modellierung.

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.

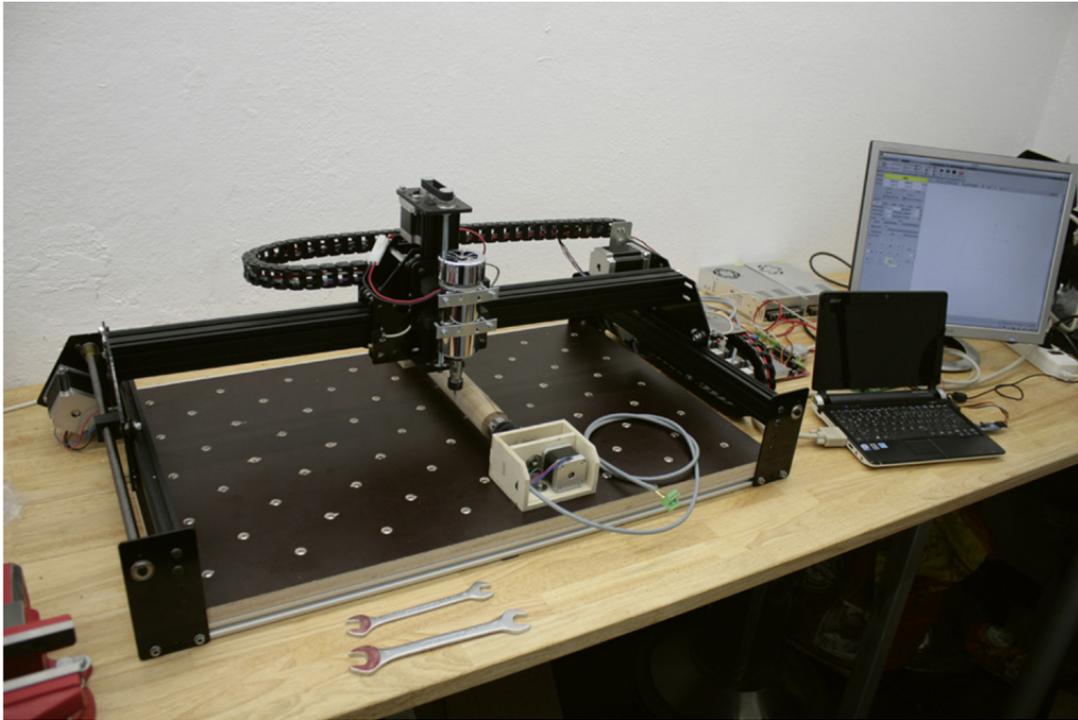


Bild 1.5 Größeres Kaliber: die Shapeoko-T mit Spindeltrieben, MaXYposi-Steuerung und vierter Achse

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.

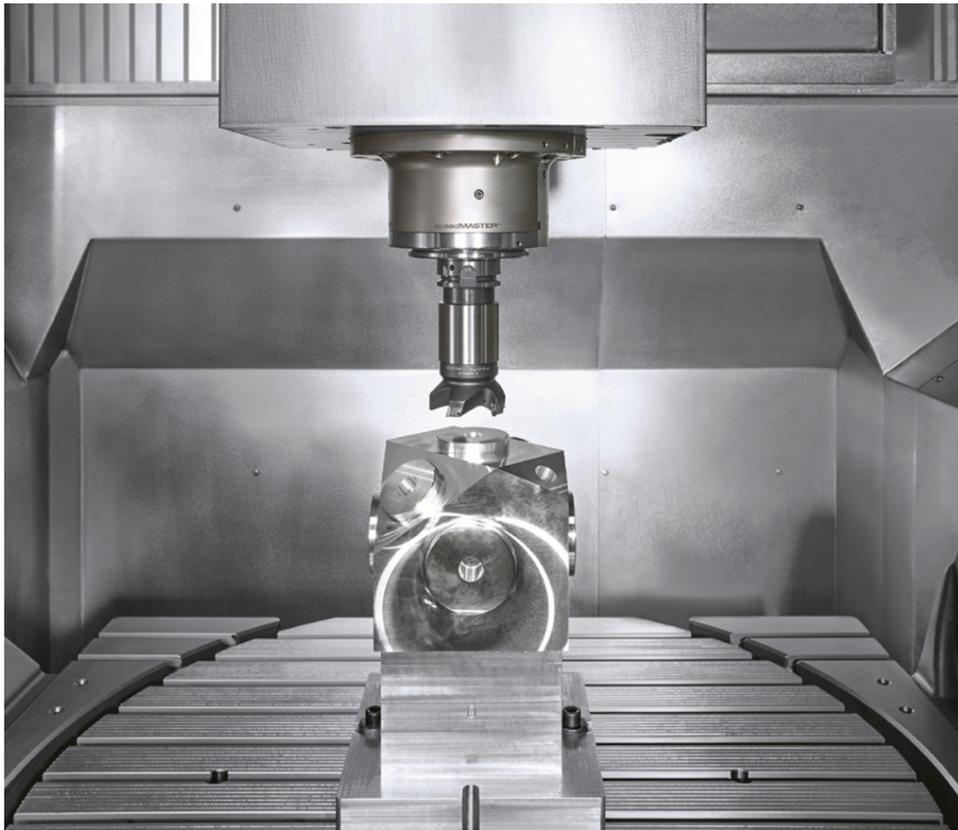


Bild 1.6 Für die Bearbeitung von Metall werden eine sehr steife Maschine und starke Motoren benötigt. Die Abbildung zeigt die Innenansicht einer DMU 95 monoblock von DMG Mori (© DMG Mori).

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 oder auf einer Modellbaummesse 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 Riementrieb, 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](https://www.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 einfachen 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 Fräsparameter 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