



OSTBAYERISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE  
AMBERG-WEIDEN

Fakultät Maschinenbau und Umwelttechnik

Studiengang Maschinenbau

**Konzeption, Aufbau und Inbetriebnahme  
einer Miniaturdrehmaschine mit Open  
Source CNC-Steuerung**

Design, construction and commissioning of a miniature lathe with an open source CNC control

Matthias Pohl





# OSTBAYERISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AMBERG-WEIDEN

Fakultät Maschinenbau und Umwelttechnik

Studiengang Maschinenbau

**Bachelorarbeit zum Erreichen des Akademischen Grades**

von

**Matthias Pohl**

**Konzeption, Aufbau und Inbetriebnahme einer Miniaturdrehmaschine mit  
Open Source CNC-Steuerung**

Design, construction and commissioning of a miniature lathe with an open source CNC  
control

Bearbeitungszeitraum: von 15. September 2016  
bis 14. Dezember 2016

1. Prüfer: Prof. Dr. W. Blöchl  
2. Prüfer: Prof. Dr. M. Wenk

Bestätigung gemäß § 12 APO

---

Name und Vorname  
der Studentin/des Studenten: **Pohl, Matthias**

Studiengang: **Maschinenbau**

---

Ich bestätige, dass ich die Bachelorarbeit mit dem Titel:

**Konzeption, Aufbau und Inbetriebnahme einer Miniaturdrehmaschine mit  
Open Source CNC-Steuerung**

selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen  
als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße  
Zitate als solche gekennzeichnet habe.

---

Datum: 14.12.2016

Unterschrift:

---

Bachelorarbeit Zusammenfassung

---

Studentin/Student (Name, Vorname):	<b>Pohl, Matthias</b>
Studiengang:	Maschinenbau
Aufgabensteller, Professor:	Prof. Dr. W. Blöchl
Durchgeführt in (Firma/Behörde/Hochschule):	Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden
Ausgabedatum: 15. September 2016	Abgabedatum: 14. Dezember 2016

---

Titel:

**Konzeption, Aufbau und Inbetriebnahme einer Miniaturdrehmaschine mit  
Open Source CNC-Steuerung**

---

Zusammenfassung:

Umbau einer bestehenden Miniaturdrehmaschine von konventionellen Antrieben auf NC-gesteuerte Antriebe mithilfe des CNC-Softwarepakets LinuxCNC und Schrittmotoren als Stellmotoren. Auslegung der einzelnen Komponenten, Aufbau, Inbetriebnahme und Messung des Gesamtsystems.

Rebuilding of an existing miniature lathe from conventional to NC-steered impulses with the CNC software package LinuxCNC and stepper motors as set engines. Designing of the single components, construction, commissioning and measuring of the overall system.

Schlüsselwörter: CNC, LinuxCNC, Drehmaschine

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>X</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Stand der Technik . . . . .	3
<b>2 Emco Unimat SL</b>	<b>4</b>
2.1 Originalmodell . . . . .	4
2.2 Konstruktion . . . . .	4
2.2.1 Maschinenbett . . . . .	4
2.2.2 Antriebsstrang . . . . .	6
2.3 Auslegung der Schrittmotorerweiterung . . . . .	7
2.3.1 Schnittkraftberechnung . . . . .	7
2.3.2 Momentberechnung . . . . .	9
2.3.3 Drehzahlberechnung . . . . .	10
2.3.4 Leistung der Hauptspindel . . . . .	12
2.3.5 Riemenberechnung . . . . .	12
2.3.6 Motorauswahl . . . . .	16
<b>3 LinuxCNC</b>	<b>18</b>
3.1 Frontend . . . . .	18
3.1.1 Standardoberflächen . . . . .	18
3.1.2 Erweiterungen . . . . .	19
3.2 Backend . . . . .	20
3.2.1 Echtzeitkernel . . . . .	21
3.2.2 EMCTASK . . . . .	21
3.2.3 EMCMOT . . . . .	21
3.2.4 EMCIO . . . . .	22
3.2.5 Hardware Abstraction Layer (HAL) . . . . .	22
3.3 Konfiguration . . . . .	23
3.3.1 Grafische Konfiguration . . . . .	23
3.3.2 INI-Datei . . . . .	24
3.3.3 HAL-Datei . . . . .	24
3.3.4 Zusatzdateien . . . . .	25

<b>4 Applikation</b>	<b>26</b>
4.1 Hardware . . . . .	26
4.1.1 Steuerungs-PC . . . . .	26
4.1.2 Schrittmotor Endstufen . . . . .	29
4.1.3 Stromversorgung . . . . .	30
4.1.4 Verbindungsglieder . . . . .	31
4.1.5 Endschalter . . . . .	32
4.1.6 Kostenaufstellung . . . . .	33
4.2 Verbindung der Komponenten . . . . .	33
4.2.1 Dell OptiPlex GX270→SMCflex . . . . .	35
4.2.2 Dell OptiPlex GX270→ Versuchsplatine . . . . .	35
4.2.3 Beaglebone Black → CRAMPS . . . . .	35
<b>5 Testläufe</b>	<b>36</b>
5.1 Messung mit Laserinterferometer . . . . .	36
5.1.1 Funktionsweise Interferometer . . . . .	36
5.1.2 Messung der Z-Achse . . . . .	36
5.1.3 Messung der X-Achse . . . . .	44
<b>6 Fazit</b>	<b>48</b>
6.1 Zusammenfassung . . . . .	48
6.2 Ausblick . . . . .	48
<b>Glossar</b>	<b>50</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>53</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>54</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>57</b>

# Symbolverzeichnis

$1 - m_c$	Anstiegswert für Schnittkraft
$1 - m_f$	Anstiegswert für Vorschubkraft
$1 - m_p$	Anstiegswert für Passivkraft
$\varepsilon_{j,@1mm}$	Absoluter Fehler bei 1 mm in mm
$\varepsilon_j$	Absoluter Fehler in mm
$r_M$	Schrittauflösung Motor in Schritte/U
$a$	Schnitttiefe in mm
$b$	Spanungsbreite in mm
$C_1$	Zahneingriffsfaktor
$d_b$	Bearbeitungsdurchmesser in mm
$d_{2,GS}$	Flankendurchmesser der Gewindespindel in mm
$d_{GS}$	Riemenscheibendurchmesser an der Gewindespindel in mm
$d_g$	Durchmesser der großen Riemenscheibe in mm
$d_k$	Durchmesser der kleinen Riemenscheibe in mm
$d_M$	Riemenscheibendurchmesser am Motor in mm
$d_{Welle}$	Wellendurchmesser in mm
$\eta_{AS}$	Wirkungsgrad des Antriebsstrangs
$e_x$	Achsabstand X-Achse in mm
$e_z$	Achsabstand Z-Achse in mm
$e$	Achsabstand in mm
$F_c$	Schnittkraft in N
$F_f$	Vorschubkraft in N
$F_l$	Längskraft an der Gewindespindel in N
$F_p$	Passivkraft in N
$h$	Spanungsdicke in mm
$s_{i,@1mm}$	Istwert bei 1 mm in mm
$s_{i,Z,@1mm}$	Istwert Z-Achse bei 1 mm in mm
$i$	Getriebeübersetzung
$K_1$	Belastungsfaktor
$K_2$	Spannrollenfaktor
$K_3$	Übersetzungszuschlag
$\kappa$	Schneidenwinkel in °
$k_{c1.1}$	Spezifische Schnittkraft in $N/mm^2$
$k_{f1.1}$	Spezifische Schnittkraft für Vorschubkraft in $N/mm^2$
$k_{p1.1}$	Spezifische Schnittkraft für Passivkraft $N/mm^2$

$L$	Riemenlänge in mm
$ST$	Schrittauflösung Motor in Schritte/U
$n_{GS,Z,@0,2mm/U}$	Drehzahl der Gewindespindel bei 0,2 mm/U Z-Achse in U/min
$n_{GS}$	Drehzahl der Gewindespindel in U/min
$n_{HS,@15mm}$	Drehzahl der Hauptspindel bei 15 mm Bearbeitungsdurchmesser in U/min
$n_{HS}$	Drehzahl der Hauptspindel in U/min
$n_{M,Z,@0,2mm/U}$	Drehzahl des Stellmotors bei 0,2 mm/U Z-Achse in U/min
$n_M$	Drehzahl des Stellmotors in U/min
$P_B$	Berechnungsleistung Zahnriemen in W
$P_{c,HS}$	Wellenleistung an der Hauptspindel in W
$P_c$	Schnittleistung in W
$P_{GBM}$	Wellenleistung der Bohrmaschine Bosch GBM RE 10 Professional in W
$P_{GS,Z}$	Übersetzungszuschlag
$P_{M,HS}$	Motorleistung an der Hauptspindel in W
$P_N$	Nennleistung Zahnriemen in W
$\varepsilon_{r,Z}$	Relativer Fehler Z-Achse in mm/mm
$\varepsilon_r$	Relativer Fehler in mm/mm
$S_{alt}$	Alter SCALE-Wert in Schritte/mm
$S_{neu}$	Neuer SCALE-Wert in Schritte/mm
$S_{Z,neu}$	Neuer SCALE-Wert Z-Achse in Schritte/mm
$s_{s,@1mm}$	Istwert bei 1 mm in mm
$m_{SP}$	Gewindesteigung der Gewindespindel in mm/U
$T_{GS,Z}$	Drehmoment an der Z-Achse in Nm
$T_{GS}$	Drehmoment an der Gewindespindel in Nm
$T_{M,Z}$	Drehmoment am Schrittmotor der Z-Achse in Nm
$T_M$	Drehmoment am Schrittmotor in Nm
$\varphi_{GS}$	Steigungswinkel der Gewindespindel in °
$\varrho'_{GS}$	Gleitreibungswinkel der Gewindespindel in °
$v_c$	Schnittgeschwindigkeit in m/min
$s_V$	Verfahrweg in mm
$v_f$	Vorschub in mm/U
$V_{vf,@0,2mm/U}$	Vorschubgeschwindigkeit bei 0,2 mm/U
$V_{vf}$	Vorschubgeschwindigkeit in mm/min

# Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer Aided Design
CNC	Computerized Numerical Control
CPU	Central Processing Unit
EAGLE	Einfach Anzuwendender Grafischer Layout Editor
GNU GPLv2	General Public License version 2
GUI	Graphical User Interface
HAL	Hardware Abstraction Layer
HMI	Human Machine Interface
MS	Microsoft
NC	Numerical Control
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
NIST	National Institute of Standards and Technology
OBJ	Wavefront Dateiformat
OTH-AW	Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden
PC	Personal Computer
RTAI	Realtime Application Interface
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerungen
STL	Standard Tessellation Language
VNC	Virtual Network Computing

# 1 Einleitung

Das Ziel der vorliegenden Bachelorarbeit war es, eine Computerized Numerical Control (CNC)-Drehmaschine mit den einfachsten und kostengünstigsten Mitteln aufzubauen. Dazu wurde eine im Rahmen der Vorlesung CNC-Projekt an der Ostbayerischen Technischen Hochschule gefertigte Drehmaschine als Grundlage genommen und eine Numerical Control (NC)-Erweiterung konzeptioniert, ausgelegt und angebaut. Dabei wurde die Maschine so konstruiert, dass Schrittmotoren an alle Linearachsen montiert und diese mit der Open-Source (General Public License version 2 (GNU GPLv2)) Maschinensteuerung LinuxCNC über eine Motorendstufe angesteuert werden konnten. Das Gesamtsystem wurde daraufhin auf Genauigkeit gemessen und mechanische Fehler anhand von Kompensationsmechanismen in der Software wurden behoben. Die Ergebnisse dieser Messungen bestätigten, dass die Kompensationen erfolgreich realisiert werden konnten und dass das Gesamtsystem eine relativ hohe Genauigkeit aufweist.

Die Bachelorarbeit ist sowohl für Heimanwender, die eine kostengünstige Alternative zu professionellen Werkzeugmaschinen suchen, als auch für Entwickler von Low-Cost Maschinen (3D-Drucker) interessant.

## 1.1 Motivation

NC-Steuerungen für Werkzeugmaschinen gibt es schon seit mehreren Jahrzehnten. Die Technologie hat sich stets weiterentwickelt und wird auch weiterhin entwickelt. So beinhalten moderne Steuerungen z.B. touchfähige Bedientafeln, können den Stromverbrauch der gesamten Maschine erfassen und sind vollkommen vernetzt [1, S. 34]. Diese Steuerungen sind aufgrund ihrer Komplexität und ihren weit entwickelten Technologien hauptsächlich der Industrie vorbehalten. Dementsprechend sind Werkzeugmaschinen mit professionellen Steuerungen sehr teuer und für den Heimanwender nicht erschwinglich. Außerdem ist ein Eingreifen oder Anpassen von professionellen Steuerungen meist damit verbunden, dass ein werkseigener Techniker die Anpassung zu hohen Stundenlöhnen und Anfahrtskosten realisieren muss. Somit ist die Entwicklung einer eigenen Maschine alleine durch die fehlende Möglichkeit der Anpassung nicht realisierbar.

Der Nutzen einer CNC-Steuerung kann beispielhaft anhand des Unterschieds zwischen Punkt- und Bahnsteuerung veranschaulicht werden. Für Bohrautomaten oder Positioniersysteme reicht eine Punktsteuerung aus. Die unterschiedlichen Achsen müssen nicht synchron zueinander verfahren. Wichtig ist nur, dass der programmierte Punkt erreicht wird. Muss nun aber z.B. die Kontur eines Kreises verfahren werden, müssen zu jedem Zeitpunkt die jeweiligen Achsen synchron zueinander verfahren, da sonst die Kreiskontur

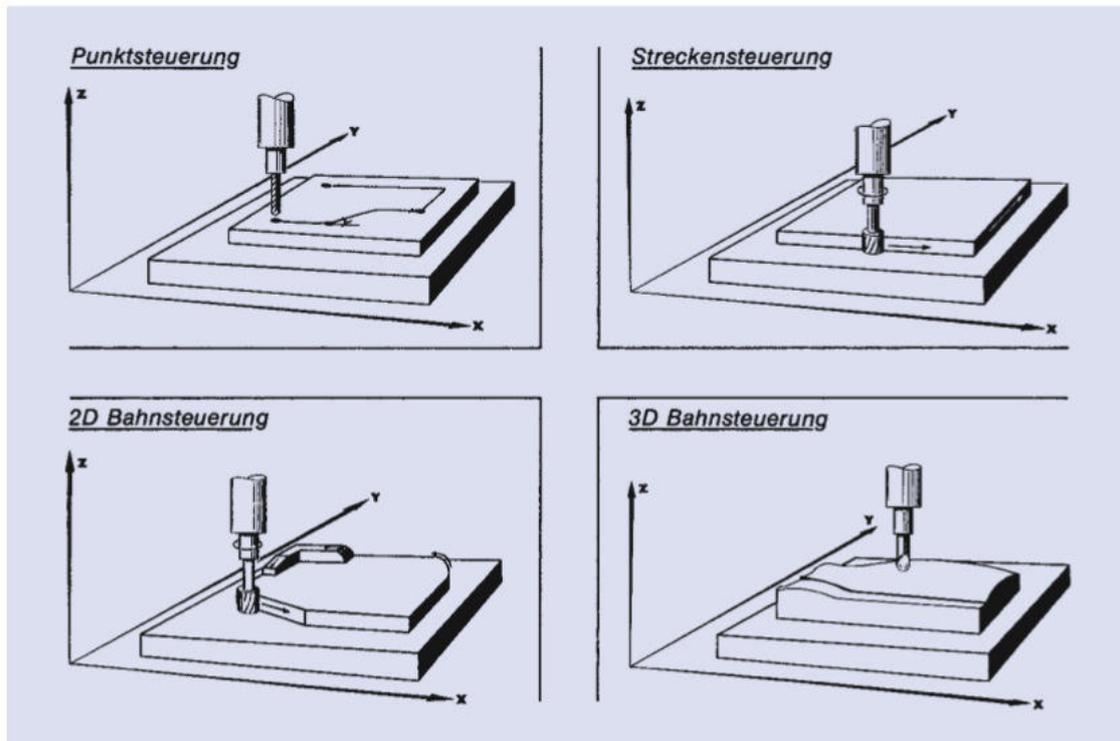


Abbildung 1.1: Vergleich Punkt-Bahnsteuerung [1, S. 41]

nicht mehr gegeben wäre. Wird zusätzlich noch senkrecht zur Ebene der beiden Achsen zugestellt, (Helix) dann müssen 3 Achsen synchronisiert werden. Eine helikale Zustellung wird bei Fräsoperationen sehr häufig angewendet. In diesem Fall liegt eine 3D-Bahnsteuerung vor (siehe Abbildung 1.1). Da aber immer mehr Technologienein simultanes Verfahren von mindestens 2 bis 3-Achsen simultan benötigen (3D-Druck, Formen fräsen, 3D-Fräsen, Kugeldrehen, etc.), ist der Einsatz einer numerisch gesteuerten Maschinen unumgänglich. Das Softwarepaket LinuxCNC ist ein Gesamtsystem, mit dem sich Maschinen aufbauen lassen, die in der Lage sind 9-Achsen gleichzeitig verfahren können. Das Ziel dieser Arbeit ist es, mit dem Paket und kostengünstiger Hardware ein System aufzubauen, mit dem sich komplexe Bauteile fertigen lassen, für die man ein simultanes Verfahren von mindestens 2-Achsen benötigt, wie z.B. eine Kugel auf einer Drehmaschine zu drehen. Aus diesem Grund wurden Schrittmotoren als Stellmotoren gewählt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Motoren ermöglichen Schrittmotoren die Rotation der Motorachse um eine definierbare Anzahl von Inkrementen. So kann eine bestimmte Position innerhalb der Auflösung des Schrittmotors angefahren werden. Diese Motoren sind im Vergleich zu Servomotoren sehr kostengünstig.

## 1.2 Stand der Technik

Zur Ansteuerung von Schrittmotoren benötigt es neben der Software, die die Schritt- und Richtungsimpulse ausgibt, eine Endstufe, die diese verstärkt. Für beide Systeme gibt es mehrere Lösungen auf dem Markt. Bei Papierdruckern wird der Druckkopf mit Schrittmotoren verfahren. Hierfür existieren hauptsächlich proprietäre Soft- und Hardware, die in den Druckern als Firmware implementiert ist. Als Open-Source Projekt für 3D-Drucker ist die Software GRBL entwickelt worden. GRBL ist in der Programmiersprache C geschrieben und kann G-Code interpretieren. Die Software läuft nicht wie LinuxCNC auf einem Personal Computer (PC), sondern wird auf Mikrocontrollern wie z.B. dem Arduino Mega implementiert. Im Gegensatz zu LinuxCNC ist GRBL nicht echtzeitfähig und nur auf Schrittmotoren beschränkt. Auch können unter GRBL keine Maschinensimulationen, Verfahrenwegsimulationen oder grafischen Benutzeroberflächen verwendet werden. Weiterhin werden nur 3 Achsen unterstützt (vgl. LinuxCNC: 9 Achsen) [2].

Als kostenpflichtige Alternative kann die Software Mach4 von der Firma Newfangled Solutions angesehen werden. Diese Software ist aus dem LinuxCNC-Projekt entstanden und wird nun in der Hobby-Version für 200\$ und in der Industrial-Version für 1.400\$ vertrieben [3]. Im Gegensatz zu LinuxCNC läuft Mach4 auf dem Betriebssystem Microsoft (MS)-Windows, und ist deswegen auch nicht echtzeitfähig.

Leseprobe