

Inhalt

Vorwort	13
1. Grundlagen	15
1.1. Warum CNC-Technik für den Hobbybereich?	15
1.2. Fräs- oder Drehmaschine?	19
1.2.1. Typen von Fräsmaschinen	20
1.2.1.1. Flachbett- oder Portalmaschinen	20
1.2.1.2. Bettfräsmaschine	21
1.2.2. Drehmaschinen	24
1.3. Koordinatensysteme	25
1.3.1. Maschinen-Koordinatensystem	25
1.3.2. Werkstück-Koordinatensystem	25
1.3.3. Das Koordinatensystem einer Fräsmaschine	25
1.3.4. Das Koordinatensystem einer Drehmaschine	26
1.4. Achsantriebe	27
1.4.1. Antriebe mit Gleichstrom-Servomotor	27
1.4.2. Antriebe mit Drehstrom-Servomotor	27
1.4.3. Antriebe mit Schrittmotor	27
1.4.4. Antriebe mit Schrittmotor-Servos	27
1.5. Positionsbestimmung	29
1.5.1. Direkte Messung	29
1.5.2. Indirekte Messung	29
1.5.3. Vertrauens-Meßsystem	29
1.5.4. Absolute und inkrementelle Wegmessung	30
1.5.5. Maschinennullpunkt	30
1.5.6. Referenzposition, Referenzfahrt	30
1.5.7. Endschalter	32
1.6. Die Steuerungsarten	34
1.7. Die Software	34
1.8. Die Steuerelektronik	36
1.9. Der Computer	37
1.10. Die Parallelschnittstelle	38
1.11. CNC-Programme nach DIN 66025	40
2. Schrittmotoren	41
2.1. Was ist ein Schrittmotor?	41
2.2. Wie funktioniert der Schrittmotor?	42
2.2.1. Der Hybridmotor	42
2.2.2. Das Prinzip der Ansteuerung	42
2.2.3. Haltemoment	43
2.2.4. Aufbau und Polzahl eines realen Motors	43
2.2.5. Die Ansteuerung des Schrittmotors	44
2.2.5.1. Motorphasen	44
2.2.5.2. Vollschritt	44
2.2.5.3. Halbschritt	44
2.2.5.4. Mikroschritt	45

2.2.6. Wicklungsausführungen	45
2.2.6.1. Wicklungen für den Betrieb mit konstanten Spannungen	45
2.2.6.2. Wicklungen für den Betrieb mit konstanten Strömen	46
2.2.6.3. Motoren mit vier Anschlüssen	46
2.2.6.4. Motoren mit sechs Anschlüssen	46
2.2.6.5. Motoren mit acht Anschlüssen	46
2.2.6.6. Jede andere Anschlussanzahl	47
2.2.7. Warnung: Fremdantrieb des Schrittmotors	47
2.2.8. Kenngrößen eines Schrittmotors	47
2.2.8.1. Anzahl Phasen	47
2.2.8.2. Schrittwinkel, Anzahl Schritte	47
2.2.8.3. Haltemoment	48
2.2.8.4. Drehmoment	48
2.2.8.5. Beschleunigungs- und Bremsrampen	50
2.2.8.6. Phasenstrom	50
2.2.8.7. Nennspannung	50
2.2.8.8. Wicklungswiderstand, Wicklungsinduktivität	51
2.2.9. Beispiele für Schrittmotoren	51
2.2.10. Endstufen für Schrittmotoren	51
2.2.10.1. H-Brücken	51
2.2.10.2. Stromregelung	54
2.2.10.3. Integrierte Schaltungen für die H-Brücken	57
3. Bau und Betrieb der Schrittmotor-Steuerung SRS 1X035	59
3.1. Die CNC-Schnittstelle	60
3.2. Die Schrittmotor-Endstufen	62
3.3. Das Netzteil	63
3.4. Die Maschinen-Schnittstelle	64
3.5. Gehäuse	67
3.6. Antrieb und Steuerung der Maschinenspindel	68
3.6.1. Spindelmotor ohne Frequenzumrichter	71
3.6.2. Spindelmotor BF20	71
3.6.3. Spindelmotor mit Frequenzumrichter	72
3.6.4. Drehstrom-Hochfrequenzspindeln	73
3.6.5. Spindeln mit BLDC-Motor	74
3.6.6. Rückmeldung der Spindeldrehzahl	74
3.6.6.1. Mit einer Gabellichtschranke	74
3.6.6.2. Mit einem Hallsensor	75
3.7. Endschalter	76
3.7.1. Mechanische Endschalter	76
3.7.2. Induktive Endschalter	76
3.8. Referenzschalter	76
3.8.1. Mechanische Referenzschalter	76
3.8.2. Induktive Referenzschalter	76
3.9. Not-Aus	76
3.9.1. Not-Aus per Software	76
3.9.2. Not-Aus per Hardware	77

4. Die Steuerung SRS 1X06	79
5. Die Steuerung SRS 14035	80
6. Die Steuersoftware Mach3	83
6.1. Die Struktur der Software	83
6.2. Mach3 Erstinstallation	85
6.3. Test der Installation.	87
6.4. Mach3 Update.	87
6.5. Demo- und Vollversion.	88
6.6. Deutsche Bedieneroberfläche	88
6.7. Mach3 starten	89
6.8. Mach3 konfigurieren.	89
6.8.1. Einheiten der Längenmaße (Select Native Units)	89
6.8.2. Einstellen der Motorparameter (Motor Tuning)	89
6.8.2.1. Ermittlung der Schritte pro Millimeter Fahrweg (Steps per)	90
6.8.2.2. Maximale Geschwindigkeit (Velocity)	90
6.8.2.3. Beschleunigung (Acceleration)	91
6.8.3. Punkt und Komma.	92
7. Nützliches Zubehör	93
7.1. Der SmoothStepper mit LAN-Anschluss	93
7.2. Das elektronische Handrad	94
7.3. Die Bedieneinheit	95
7.4. Werkzeuglängen-Sensor	96
7.5. Kantentaster	97
7.6. Drehachse (Rundtisch)	98
8. Die Praxis	99
8.1. Erzeugen des CNC-Programms	101
8.1.1. Die Elemente eines Frästeils	101
8.1.1.1. Konturen	101
8.1.1.2. Taschen und Inseln	101
8.1.1.3. Bohrungen	102
8.1.2. Ablauf der CNC-Fertigung des Beispielteils	102
8.2. Am Anfang steht die Zeichnung	102
8.2.1. Vektor- oder Rastergrafik?	102
8.2.2. Konvertieren vom Raster- ins Vektorformat	103
8.2.3. Zeichenprogramme	103
8.2.3.1. Für Grafiker	104
8.2.3.2. Für Maschinenbauer und Architekten	105
8.3. Programmiersprachen	106
8.3.1. G-Code.	106
8.3.2. HPGL.	106
8.3.3. Dateinamenerweiterungen von CNC-Programmen.	107
8.4. Manuelle Programmierung in G-Code	108
8.5. Aus DXF oder HPGL G-Code generieren	108
8.6. Von der Idee zum fertigen Teil	108
8.7. Sonderfall CNC-Drehen	110
8.7.1. CNC-Generator RCLATHE.	110

8.7.2. Herstellen eines Drehteils mit den Wizards in Mach3	112
8.8. Marktübersicht CNC-Generatoren für das Fräsen	112
8.9. Ausgewählte Programme	115
8.9.1. Filou-NC	115
8.9.2. SimplyCAM	116
8.9.3. RealCAM	117
8.9.4. SheetCam TNG	117
8.9.5. LazyCAM	118
8.10. Steuersoftware mit integrierten Zeichenfunktionen	118
8.11. Sonderfall PC-NC	118
9. Technologie Fräsen	119
9.1. Wahl der Fräswerkzeuge für die Metallbearbeitung	119
9.1.1. Schrump- oder Schlichtfräser?	119
9.1.2. Länge und Durchmesser	119
9.1.3. Schneiden über Mitte	120
9.1.4. Material des Fräasers	121
9.1.5. Wie viele Zähne?	121
9.2. Einspannen der Fräser	121
9.2.1. Bei Bettfräsmaschinen	121
9.2.2. Bei Portalmaschinen	123
9.3. Zu bearbeitendes Material	124
9.4. Drehzahl, Frästiefe und Vorschubgeschwindigkeit	125
9.4.1. Für die Bettfräsmaschine	125
9.4.2. Für die Portalfräsmaschine	125
9.5. Gleichlauf oder Gegenlauf?	126
9.6. Kühlung und Schmierung	126
9.7. Staubabsaugung	127
9.8. Resonanzen	128
9.9. Aufspannen des Werkstücks	129
9.9.1. Auf den Maschinentisch	130
9.9.2. Mit einer Zwischenplatte	131
9.9.3. Im Maschinenschraubstock	131
9.9.4. Aufspannen runder Teile im Drehfutter	132
9.9.5. Aufspannen dünner, flacher Materialien	133
9.9.6. Auf der Vakuumplatte	136
9.10. Einrichten der Maschine	137
9.10.1. Der Werkstück-Nullpunkt	137
9.10.2. Finden des Werkstück-Nullpunkts	138
9.10.2.1. Mit der Mess-Spitze	138
9.10.2.2. Mit dem rotierenden Kantentaster	138
9.10.2.3. Mit dem 3D-Taster	139
9.10.2.4. Mit dem elektronischen Kantentaster	139
9.10.2.5. Verwendung von Anschlägen	140
9.10.3. Der Werkzeug-Nullpunkt	141
9.10.4. Einstellen des Werkzeug-Nullpunkts	142
10. Technologie Drehen	145

10.1. Wahl der Drehwerkzeuge	145
10.2. Einspannen der Werkzeuge	146
10.2.1. Maschinen mit einfachen Stahlhaltern	146
10.2.2. Maschinen mit Wechsel- oder Mehrfach-Stahlhaltern	146
10.3. Einmessen der Werkzeuge	147
10.4. Drehzahl, Vorschub und Zustellung	148
10.5. Kühlung	148
11. Praktische Beispiele Fräsen	149
11.1. Getriebegehäuse aus Aluminium	151
11.1.1. Erstellen der Zeichnung	151
11.1.2. Konfigurieren von Maschine und Material	152
11.1.3. Die Werkzeugeleisten des Programms	153
11.1.4. Einlesen der Zeichnung	153
11.1.5. Bearbeitungswerkzeuge anlegen	154
11.1.6. Definition der Bearbeitungsprozesse	156
11.1.6.1. Tasche	156
11.1.6.2. Innenkonturen	157
11.1.6.3. Bohrungen	158
11.1.6.4. Außenkontur	158
11.1.6.4.1. Schnittanfang	159
11.1.6.4.2. Schnittpfad	160
11.1.7. Linienfarben ändern	160
11.1.8. Prozesse ein- und ausblenden	160
11.1.9. 3D-Ansicht	161
11.1.10. Prozesse neu anordnen, ändern oder löschen	161
11.1.11. Generieren des G-Code	161
11.1.12. Simulation	161
11.1.13. Änderungen vornehmen	163
11.1.14. Eigene Postprozessoren	163
11.1.15. Fräsen des Getriebegehäuses	163
11.2. Spant für ein Modellschiff	170
11.2.1. Umwandlung einer Rastervorlage in eine DXF-Datei	170
11.2.2. Generieren des Fräsprogramms	171
11.2.3. Fräsen des Spants	172
11.3. Fräsen von Frontplatten	174
11.4. Schriften fräsen	178
11.5. Frontplatten ganz einfach	180
11.6. Platinen Fräsen	180
11.6.1. Pro und Contra	180
11.6.2. Das Verfahren	181
11.6.3. Die Software pcb-gcode für Eagle	182
11.6.4. Konfigurieren von pcb-gcode	182
11.6.5. Generieren der Fräs- und Bohrdaten in Eagle	185
11.6.6. Das Aufspannen der Platine	187
11.6.7. Das Fräswerkzeug	189
11.6.8. Werkstück-Nullpunkt	189

11.6.9. Höheneinstellung	189
11.6.10. Eintauchtiefe	189
11.6.11. Spindeldrehzahl	190
11.6.12. Das Fräsen	190
11.6.13. Das Bohren	190
11.6.14. Doppelseitige Platinen	190
11.6.15. Andere Layout-Programme	190
11.6.16. Sonstige Informationen	190
12. Praktisches Beispiel Drehen	191
12.1. Programmerstellung mit RCLATHE	192
12.2. Programmerstellung mit Wizards	192
13. Die CNC-Fräsmaschine als Zeichenmaschine	195
14. Manuell GCode programmieren	197
14.1. CNC-gerechte Zeichnungen	197
14.2. Werkstück-Nullpunkt	198
14.3. Arbeitsablauf festlegen	198
14.4. Programmaufbau	200
14.5. Satzaufbau	200
14.5.1. Satznummer	200
14.5.2. Sonderzeichen	200
14.5.3. Wegbedingungen (G-Codes)	201
14.5.4. Zielkoordinaten	201
14.5.5. Schaltfunktionen (M-Codes)	202
14.5.6. Parameter	202
14.6. Zahlen	202
14.7. Maßangaben	202
14.7.1 Absolute Maßangaben	202
14.7.2 Inkrementelle Maßangaben (Kettenmaße)	203
14.8. Zerspanungsdaten (Drehzahl und Vorschub)	203
14.9. Programmierung von Geraden	205
14.10. Kreisprogrammierung	206
14.10.1. Vollkreise	206
14.10.2. Kreisbögen	207
14.10.2.1. Das Radiusformat	206
14.10.2.1.1. Absolute Maßangaben	206
14.10.2.1.2. Inkrementelle Maßangaben	207
14.10.2.2. Das Mittelpunktformat	207
14.10.2.2.1. Absolute Maßangaben, I-J absolut	208
14.10.2.2.2. Absolute Maßangaben, I-J inkrementell	208
14.10.2.2.3. Inkrementelle Maßangaben, I-J inkrementell	208
14.10.2.3. Beispiel für die Kreisprogrammierung	209
14.11. Werkzeugbahnkorrektur	209
14.11.1. Sinn und Zweck	209
14.11.2. Festlegen des Fräserdurchmessers	211
14.11.3. Richtige und falsche Werkzeugbahnen	211
14.11.4. Anfahren der Kontur	211

14.11.5. Wegfahren und Abbau der Korrektur	214
14.11.6. Pause während der Werkzeugbahnkorrektur	215
14.12. Unterprogramme	215
14.13. Polare Koordinaten	219
14.14. Bohrzyklen	222
14.14.1. Zyklus Bohren, Rückzug im Eilgang – G81	222
14.14.2. Zyklus Bohren, Verweilen, Rückzug mit Eilgang – G82	223
14.14.3. Zyklus Tieflochbohren – G83	223
14.14.4. Zyklus Bohren, Rückzug mit Vorschub – G85	224
14.14.5. Zyklus Bohren, Spindel aus, Rückzug mit Eilgang – G86	224
14.14.6. Zyklus Bohren, Spindel aus, manueller Rückzug – G88	225
14.14.7. Zyklus Bohren, Verweilen, Rückzug mit Vorschub – G89	225
14.14.8. Zyklus schnelles Tieflochbohren – G73	226
14.14.9. Lineare Lochreihen programmieren	226
14.14.10. Rückzugebene definieren – G98, G99	227
14.15. Werkstück- und Werkzeug-Offsets programmieren	228
14.15.1. Setzen der Werkzeug-Offsets	228
14.15.2. Setzen der Werkstück-Offsets	228
14.16. Nullpunktverschiebung im Koordinatensystem	228
14.17. Drehen des Koordinatensystems	229
14.18. G-Code Referenz (Wegbedingungen)	230
14.18.1. Fahren im Eilgang – G0	231
14.18.2. Lineares Fahren mit Vorschubgeschwindigkeit – G1	231
14.18.3. Kreisbogen mit Vorschubgeschwindigkeit – G2 und G3	231
14.18.3.1 Radiusformat	231
14.18.3.2. Mittelpunktformat	231
14.18.4. Verweilen – G4	231
14.18.5. Werkstück- und Werkzeug-Offsets – G10	232
14.18.6. Vollkreis – G12 und G13	232
14.18.7. Polares Koordinatensystem abschalten – G15	232
14.18.8. Polares Koordinatensystem einschalten – G16	232
14.18.9. Ebenen auswählen – G17, G18, G19	232
14.18.10. Längeneinheit wählen – G20, G21	232
14.18.11. Maschinen-Nullpunkt anfahren – G30	233
14.18.12. Werkzeugbahn-Korrektur – G40, G41, G42	233
14.18.13. Werkzeuglängen-Offsets – G43, G44, G49	233
14.18.14. Skalierungsfaktoren setzen – G50, G51	233
14.18.15. Nullpunktverschiebung im Koordinatensystem – G52	233
14.18.16. Folgende Position in Maschine-Koordinaten – G53	234
14.18.17. Werkstück-Nummer wählen – G54 bis 59	234
14.18.18. Bahn-Modus setzen – G61, G64	234
14.18.19. Drehen des Koordinatensystems – G68, G69	234
14.18.20. Längeneinheit wählen – G70, G71	234
14.18.21. Zyklus schnelles Tieflochbohren – G73	234
14.18.22. Modale Bewegungen ausschalten – G80	235
14.18.23. Zyklus Bohren, Rückzug im Eilgang – G81	235

14.18.24. Zyklus Bohren, Verweilen, Rückzug mit Eilgang – G82	235
14.18.25. Zyklus Tieflochbohren – G83	235
14.18.26. Zyklus Bohren, Rückzug mit Vorschub – G85	235
14.18.27. Zyklus Bohren, Spindel aus, Rückzug mit Eilgang – G86	235
14.18.28. Zyklus Bohren, Spindel aus, manueller Rückzug – G88.	235
14.18.29. Zyklus Bohren, Verweilen, Rückzug mit Vorschub – G89	235
14.18.30. Absolute Maßangaben – G90	236
14.18.31. IJ-Modus absolut – G90.1	236
14.18.32. Inkrementelle Maßangaben – G91	236
14.18.33. IJ-Modus inkrementell – G91.1.	236
14.18.34. Rückzugebene definieren – G98, G99.	236
14.19. M-Code Referenz (Schaltfunktionen).	236
14.19.1. Programm Pause – M0.	236
14.19.2. Programm Ende – M2	236
14.19.3. Spindel an im Uhrzeigersinn – M3	237
14.19.4. Spindel an im Gegenuhrzeigersinn – M4	237
14.19.5. Spindel aus – M5	237
14.19.6. Werkzeugwechsel – M6.	237
14.19.7. Kühlung Nebel an – M7.	237
14.19.8. Kühlung Schwall an – M8.	237
14.19.9. Kühlung aus – M9	238
14.19.10. Programmende und Rücklauf – M30.	238
14.19.11. Programm ab dem ersten Satz wiederholen – M47.	238
14.19.12. Manuelle Änderung von Vorschub und Drehzahl erlauben – M48	238
14.19.13. Manuelle Änderung von Vorschub und Drehzahl verbieten – M49	238
14.19.14. Ausführen eines Unterprogramms – M98	238
14.19.15. Rückkehr aus einem Unterprogramm – M99	238
14.20. Referenz Adressbuchstaben	239
14.21. Reihenfolge der Befehlsausführung in einem Programmsatz.	239
14.22. Standard-Programmanfang	240

1. Grundlagen

1.1. Warum CNC-Technik für den Hobbybereich?

NC-Maschinen, die Vorläufer der CNC-Technik, sind keine Entwicklung der letzten Jahre. Die erste NC-Fräsmaschine lief bereits 1952 im amerikanischen M.I.T. Sie wurde mit Elektronenröhren gesteuert und konnte simultan drei Achsen linear bewegen. Das Fräsprogramm wurde über Lochstreifen eingegeben. Im Jahr 1960 wurden Steuerungen mit Transistortechnik eingeführt, 1972 gab es die erste Steuerung mit eingebautem Computer – der Übergang von NC (Numerical Control) zu CNC (Computer Numerical Control). Seit dem Jahr 2000 gibt es CNC-Maschinen mit Internet-Schnittstelle – damit sind der weltweite Austausch von Bearbeitungsprogrammen und die Fernwartung der Maschinen möglich.

Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen, NC- oder CNC-Maschinen genannt, gehören heute zum Standard der modernen Fertigung. Dabei beschränken sich die Fertigungsverfahren nicht nur auf das Fräsen und Drehen. Wasserstrahlschneiden, Laserschneiden, Plasmaschneiden, Stanzen, Biegen und Schweißen sind nur einige der Technologien, die mit CNC-Steuerung für preisgünstige und präzise Werkstücke sorgen. Praktisch alle Werkzeugmaschinen, die heute auf den Markt kommen, sind mit einer CNC-Steuerung ausgerüstet.

Eine weitere Technologie, die in letzter Zeit speziell die Aufmerksamkeit der Medien gewonnen hat, ist der 3D-Druck. Im Gegensatz zu den oben beschriebenen abtragenden Verfahren arbeitet der 3D-Druck additiv oder auftragend. Diese auch als Rapid Prototyping bekannten Verfahren gibt es seit den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts, sie wurden vorzugsweise für die direkte Erstellung von Prototypen und Werkzeugen aus CAD-Daten eingesetzt. Mit der Verfügbarkeit von immer mehr verschiedenen Materialien, einschließlich Metallen (z.B. Lasersintern) wandelt sich die Technologie immer mehr in Richtung Rapid Manufacturing. Mit der Verfügbarkeit preisgünstiger Desktop 3D-Drucker können diese Verfahren nun auch im Hobbybereich eingesetzt werden.

Natürlich fragen Sie sich, ob die relativ komplizierte und teure CNC-Technik für den Hobbybereich überhaupt sinnvoll einsetzbar ist. Schauen wir uns deshalb erst einmal an, warum die Industrie CNC-Maschinen statt konventioneller Werkzeugmaschinen verwendet:

1. Auch sehr komplizierte Werkstücke sind leicht herstellbar
2. Kürzere Durchlaufzeiten, damit kürzere Lieferzeiten
3. Höhere Flexibilität der Fertigung
4. Kleinere optimale Losgrößen
5. Gleichbleibende Genauigkeit, unabhängig vom Maschinenbediener

6. Reduzierte Prüfkosten
7. Weniger Ausschuss
8. Ein Mitarbeiter kann mehrere Maschinen bedienen – geringere Personalkosten
9. Größere Fertigungskapazität bei gleichen Raumkosten
10. Integration von Konstruktion und Fertigung über CAM (Computer Aided Manufacturing, Produktion mit Computerunterstützung)

Während alle diese Punkte für einen Industriebetrieb eine hohe Bedeutung haben, sind für den Hobbytechniker nur die Punkte 1, 5, 7 und 8 interessant, wobei der Punkt 1 der wichtigste sein dürfte. Zur Verdeutlichung möchte ich erzählen, was mich zum Bau meiner ersten CNC-Fräsmaschine veranlasst hat.

Ich hatte zu der Zeit eine Dreizylinder-Modell dampfmaschine, Kennern als Stuart-Triple bekannt, im Bau. Diese Maschine besitzt sechs Stopfbüchsen für die Kolben- und Schieberstangen. Zu den Stopfbüchsen gehören Stopfbüchsenbrillen, die eine relativ komplizierte Form haben.

Zwar hätte ich diese Teile mithilfe eines Rundtisches anfertigen können, bei den geringen Abmessungen ist das jedoch ein recht

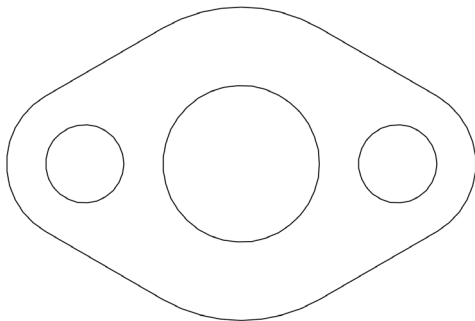


Abb. 1: Die CAD-Zeichnung einer Stopfbüchsenbrille

schwieriges Unterfangen, zeitraubend und mit einer hohen Ausschussrate behaftet. Dieses Problem, dem ich in der Vergangenheit des Öfteren begegnet bin, wollte ich nun ein für alle Mal lösen. Also habe ich meine Triple erst einmal für ein Jahr beiseitegelegt und mich in die CNC-Technik vertieft.

Das Resultat war meine erste CNC-Fräsmaschine mit einer Steuerungselektronik, die aus fertig gekauften und selbst gebauten Komponenten bestand. Das Ergebnis meiner Mühe zeigt Abb. 2.

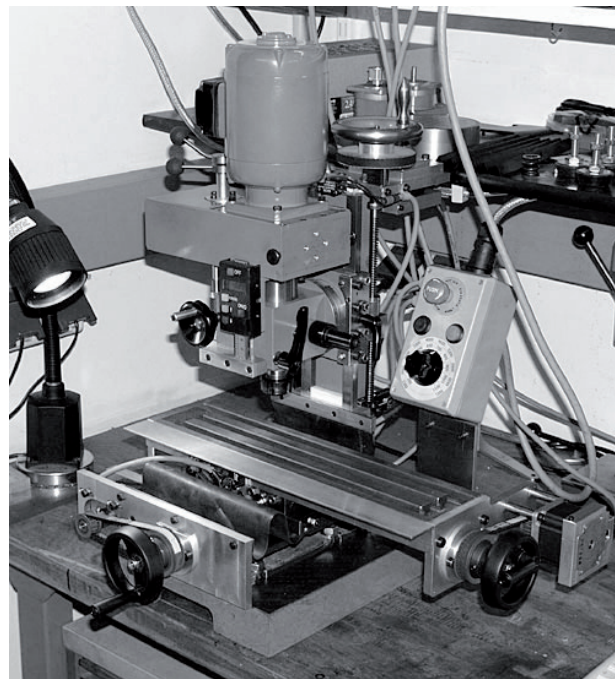


Abb. 2: Meine erste selbstgebaute CNC-Fräsmaschine

Mit dieser Maschine habe ich dann die sechs Stopfbüchsenbrillen meiner Triple gefräst, wie Abb. 3 beweist.

Die Erstellung des Fräsprogramms für die Teile hat nur wenige Minuten in Anspruch genommen, das Fräsen selbst war innerhalb von zwei Stunden erledigt. Nach der konven-

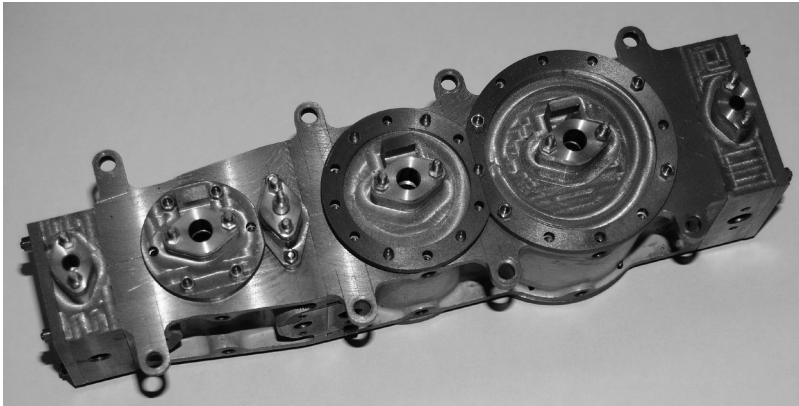


Abb. 3: Der zum Teil CNC-gefräste Zylinderblock meiner Stuart Triple mit den sechs Stopfbüchsenbrillen

tionellen Methode hätte ich dafür sicherlich einen ganzen Tag benötigt.

Auch die äußere Kontur des Zylinderblocks und die Zylinderdeckel mit ihren Bohrungen und Stopfbüchsen sind mit der CNC-Fräsmaschine hergestellt, mit einer Genauigkeit, die von Hand nur unter größten Schwierigkeiten erreichbar ist.

Speziell bei einem Modell wie der Stuart Triple, bei der viele Teile mehrfach angefertigt werden müssen, lohnt sich der Einsatz der CNC-Technik, wie z.B. bei den Haltern der Umsteuerwelle (Abb. 4) oder den Kulissen der Stephenson-Steuerung (Abb. 5).

Abb. 4: Die Halter der Umsteuerwelle, noch mit dem Rohmaterial verbunden



Abb. 5: Kulissen der Stephenson-Steuerung

Dies sind nur einige Beispiele, die sich beliebig fortführen lassen. Denken Sie nur an die Räder einer Modelldampflokomotive, die Felgen eines Modellautos, die Tragflächenrippen eines Flugzeugs oder die Spanten eines Schiffes.

Eine interessante Fräsarbeit waren auch die Lufteintritte für die Lüfter in der Rückwand meiner Steuerung (Abb. 6). Eine Arbeit, die auf einer manuell bedienten Maschine nicht mehr möglich ist, weil das Blech mehr als 400 mm lang ist und sich kaum auf einem Rundtisch bearbeiten lässt.

Bisher haben wir nur Beispiele aus dem Bereich der zweidimensionalen Formen gesehen, die sich notfalls auch noch mit konventionellen Techniken anfertigen lassen.

Wenn es aber in den Bereich der dreidimensionalen Bearbeitung geht, ist eine Herstellung der Bauteile praktisch nur noch mit CNC-Maschinen möglich. Ein gutes Beispiel dafür sind Schiffspropeller oder Schauflerräder für Modell-Gasturbinen.

Natürlich wird für die dreidimensionale Konstruktion und die Umsetzung in ein Fräsprogramm eine leistungsfähige Software benötigt, die leider auch nicht ganz billig ist.

Die einfache Fertigung komplizierter Werkstücke ist sicherlich der wichtigste Grund, CNC-Technik in der Hobbywerkstatt einzusetzen. Aber auch die gleich bleibende Genauigkeit, unabhängig vom Maschinenbediener, ist nicht zu vernachlässigen. Natürlich



Abb. 6: Fräsen der Lufteintritte in der Rückwand des Steuerungs-Gehäuses

lich sind es fast immer wir selbst, die unsere Maschinen bedienen. Wer hat es aber noch nicht erlebt, dass es Tage gibt, an denen er fast nur Ausschuss produziert. Einmal nur das Handrad der Fräsmaschine in die falsche Richtung gedreht und das Teil ist hinüber. Das kann einer CNC-Maschine nicht passieren – sie ist einfach nicht „schlecht drauf“.

Der Punkt „Ein Mitarbeiter kann mehrere Maschinen bedienen – geringere Personalkosten“ ist natürlich für uns, unter dem Gesichtspunkt der Personalkosten, nicht wirklich relevant. Andererseits empfinde ich es als sehr angenehm und zeitsparend, an der Drehmaschine ein Teil anzufertigen, während meine CNC-Fräsmaschine hinter mir weitere Teile ohne mein Zutun produziert.

1.2. Fräs- oder Drehmaschine?

Sehen wir einmal von relativ komplizierten Drehteilen wie Kugeln, Kegeln, Hohlkehlen oder großen Gewinden ab, so lässt sich fast jedes Drehteil relativ problemlos auch in konventioneller Technik herstellen. Dies trifft auf Frästeile nicht zu. Selbst Frästeile, an denen lediglich Rundungen mit konstantem Radius und Schrägen vorkommen, sind nur mithilfe eines Rundtisches und mit mehrfachem Umspannen herstellbar. Die notwendige Koordination, um diese Formen nur durch Verstellen der Handräder zu erzeugen, bringt niemand auf.

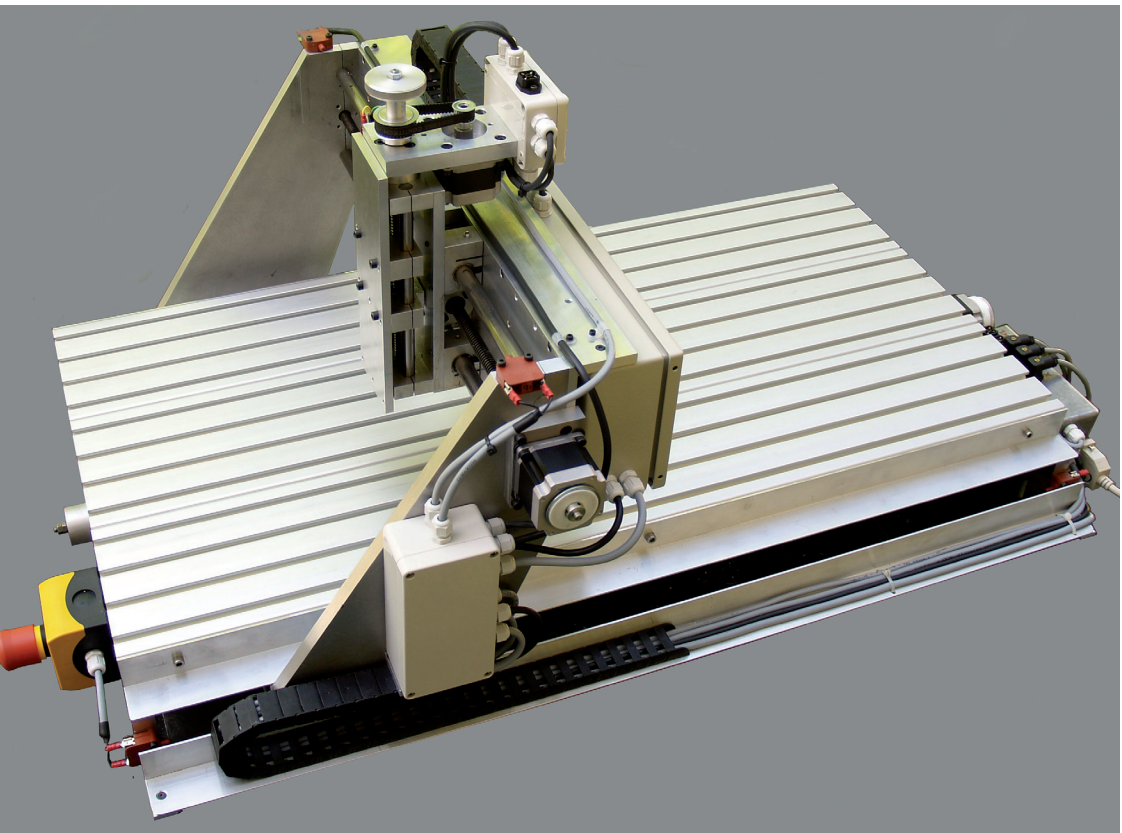


Abb. 7: Meine erste, selbstgebaute Portalfräsmaschine, es fehlt noch der Fräsmotor

2. Schrittmotoren

2.1. Was ist ein Schrittmotor?

So wie die meisten Elektromotoren besteht auch ein Schrittmotor aus dem feststehenden Stator und dem um die Motorachse beweglichen Rotor. Wird dem Motor in der richtigen Art und Weise elektrische Energie zugeführt, dreht sich der Motor und gibt mechanische Energie ab.

Im Gegensatz zu einem „normalen“ Elektromotor, der eine kontinuierliche Drehbewegung ausführt, bewegt sich der Schrittmotor in einzelnen Schritten. Die Anzahl der Schritte, die für eine vollständige Umdrehung notwendig sind, hängt von der Bauart

des Motors ab. Gängige Motoren gibt es mit 100, 200 oder 400 Schritten pro Umdrehung, entsprechend einem Schrittwinkel von $3,6^\circ$, $1,8^\circ$ bzw. $0,9^\circ$. Je kleiner der Schrittwinkel, bzw. je größer die Anzahl Schritte pro Umdrehung, desto genauer kann der Motor positionieren.

Der Motor ist in geeigneter Weise, entweder direkt oder über einen Zahnriemenantrieb, mit der Vorschub-Gewindespindel der Werkzeugmaschine gekoppelt. Nehmen wir an, dass ein Motor mit 200 Schritten über eine Zahnriemen-Untersetzung von 1:2 die Spindel antreibt und diese eine Steigung von 2,5 mm aufweist. Für eine volle Umdrehung der Spindel muss der Motor dann $2 \times 200 = 400$ Schritte ausführen. Der von der Spindel

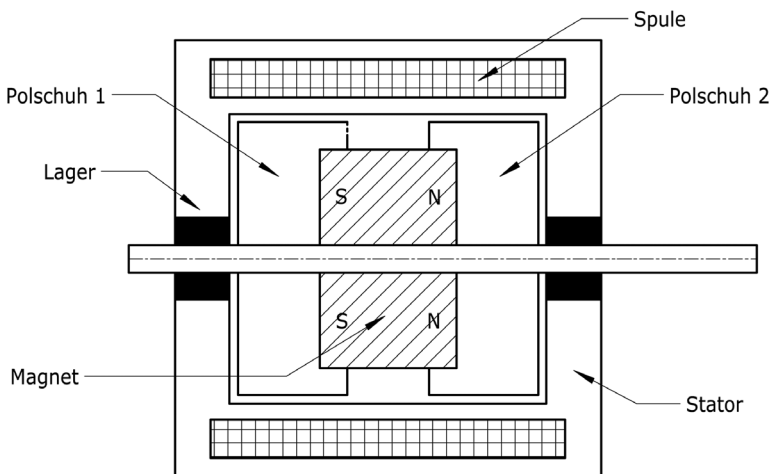


Abb. 26: Ein Hybrid-Schrittmotor im Längsschnitt

angetriebene Werkzeugmaschinentisch bewegt sich dann um 2,5 mm. Um den Tischvorschub pro Motorschritt auszurechnen, teilen wir 2,5 mm durch 400. Das Ergebnis sind 0,00625 mm – besser als ein hundertstel Millimeter.

2.2. Wie funktioniert der Schrittmotor?

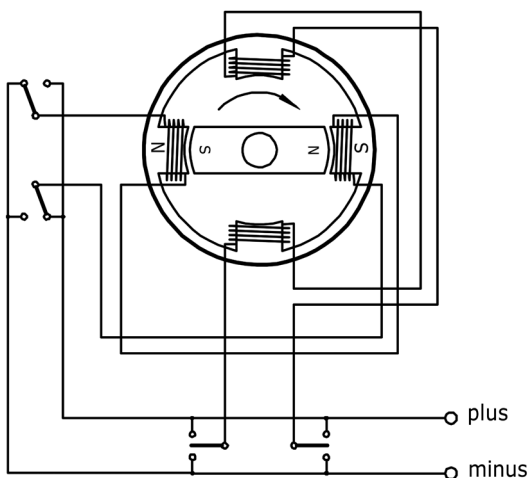
Leider genügt es nicht, dem Schrittmotor einfach Strom zuzuführen, um ihn in Bewegung zu setzen, dafür ist eine ziemlich komplizierte Elektronik erforderlich. Der Grund liegt in seiner Bauart, mit der wir uns nachfolgend beschäftigen werden.

2.2.1. Der Hybridmotor

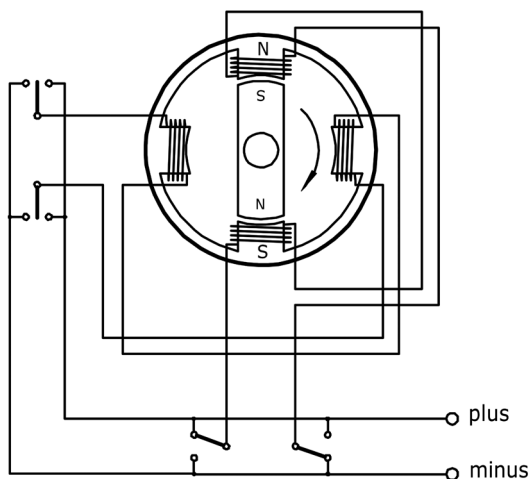
Neben verschiedenen anderen Bauformen ist der sogenannte Hybridmotor der heute am meisten eingesetzte Motortyp. Der Rotor eines Hybridmotors besteht aus zwei gezahnten Polschuhen mit einem dazwischen liegenden Dauermagneten. Der Stator ist ebenfalls gezahnt und nimmt die Ansteuerpulen auf. Durch eine sinnreiche Anordnung der Verzahnungen ergibt sich die Polzahl und damit der Schrittwinkel des Motors.

2.2.2. Das Prinzip der Ansteuerung

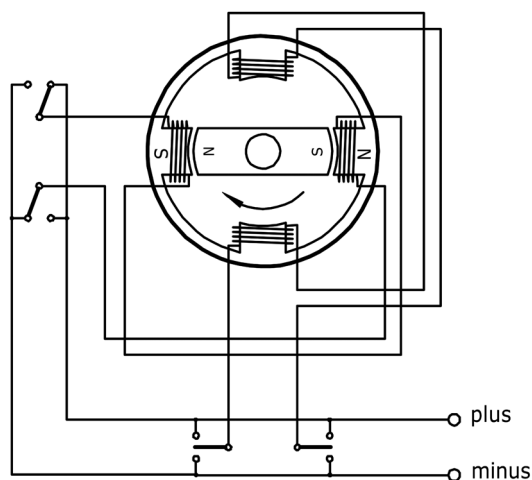
Um das Prinzip der Ansteuerung zu verstehen, genügt eine stark vereinfachte Darstellung, bei der der Rotor – bestehend aus einem Permanentmagneten – zwei Pole und der Stator vier Pole besitzt.



Schritt 1



Schritt 2



Schritt 3

Abb. 27: Prinzip der Schrittmotor-Ansteuerung

In der angenommenen Ausgangslage fließt der Strom durch die senkrecht angeordneten Wicklungen. Die Richtung des Stromes sorgt dafür, dass sich oben ein Südpol und unten ein Nordpol ausbilden. Weil sich unterschiedliche Pole anziehen, nimmt der Rotor eine stabile Lage ein, bei der sich jeweils ein Nordpol und ein Südpol gegenüberstehen.

Damit der Motor einen Schritt im Uhrzeigersinn ausführt, wird der Strom durch die senkrechte Wicklung unterbrochen und dafür die waagerechte Wicklung eingeschaltet. Nun zieht der Nordpol der Wicklung den Südpol, der Südpol der Wicklung den Nordpol des Rotors an – der Rotor dreht sich um eine Viertelumdrehung.

Für den zweiten Schritt fließt der Strom wieder durch die senkrechte Wicklung, diesmal aber in umgekehrter Richtung. Damit vertauschen sich die Magnetpole der Wicklung, der Motor dreht durch die Anziehungskraft wieder um eine Viertelumdrehung weiter.

Im Schritt drei fließt der Strom in umgekehrter Richtung durch die waagerechte Wicklung und danach bringt der vierte Schritt den Motor wieder in die Ausgangslage.

Der Motor hat nun eine volle Umdrehung im Uhrzeigersinn vollzogen. Um den Motor

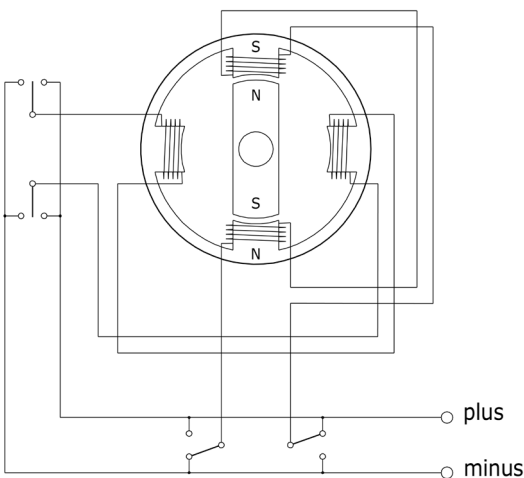
gegen den Uhrzeigersinn drehen zu lassen, müssen die Vorgänge nur in der umgekehrten Reihenfolge ablaufen.

2.2.3. Haltemoment

Solange in einer beliebigen Position im Stillstand des Motors Strom durch eine Wicklung fließt, ist es sehr schwer, den Motor von Hand weiterzudrehen. Der Motor besitzt ein Haltemoment, das in N/m (Newton/Meter) angegeben wird, mehr dazu im Abschnitt „Kenngrößen eines Schrittmotors“. Das Haltemoment sorgt dafür, dass der Motor und damit natürlich auch die angetriebene Achse der Werkzeugmaschine eine stabile Position einnimmt, ohne dass dazu eine zusätzliche Bremse oder ähnliche Vorrichtungen erforderlich sind.

2.2.4. Aufbau und Polzahl eines realen Motors

In der Realität besitzt ein Schrittmotor natürlich nicht nur vier Statorpole und zwei Rotorpole. Ein typischer Motor mit 200 Schritten besitzt zum Beispiel einen Stator mit 40 und einen Rotor mit 50 Polen. Durch entsprechende Anordnung und den Versatz der mechanischen Pole ergibt sich dann die Schrittzahl. Eine genaue Erklärung der An-



Ausgangslage / Schritt 4

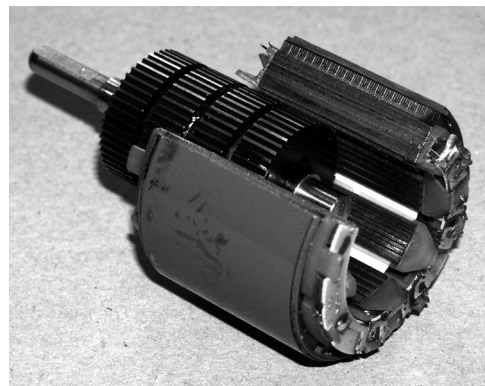


Abb. 28: Aufgeschnittener Stator eines Schrittmotors mit Rotor

ordnung der Stator- und Rotorpole würde für dieses Buch zu weit führen, wer sich dafür interessiert, findet Hinweise auf Publikationen im Literaturverzeichnis.

2.2.5. Die Ansteuerung des Schrittmotors

2.2.5.1. Motorphasen

Unser Beispielmotor verfügt über vier Wicklungen, von denen jeweils zwei zusammengeschaltet sind. Diese zusammengeschalteten Wicklungen heißen „Phasen“. Der Motor verfügt also über zwei Phasen und wird deshalb auch Zweiphasenmotor genannt. Reale Motoren verfügen über mehr als vier Wicklungen, wie Abb. 28 erkennbar, diese sind aber dennoch zu zwei Phasen zusammengeschaltet.

Neben den Zweiphasenmotoren werden auch Fünf-Phasenmotoren oder Dreiphasenmotoren gebaut, diese haben aber für uns keine besondere Bedeutung. Obwohl es z.B. Fünf-Phasenmotoren mit Auflösungen von 500 oder auch 1.000 Schritten gibt, die sehr präzise positionieren können, ist die Ansteuerung dieser Motoren sehr kompliziert und kostspielig. In diesem Buch wird deshalb nur auf Zweiphasen-Motoren eingegangen.

2.2.5.2. Vollschritt

Im vorigen Abschnitt haben wir gesehen, wie durch das Ein- und Ausschalten der Phasen bzw. die Umkehr der Stromrichtungen in den Phasen unser theoretischer Motor in Bewegung gesetzt wird. Dabei war immer nur eine Phase des Motors aktiv. Der Motor wurde im „Wave Drive“ betrieben.

Bei realen Motoren besteht nun auch die Möglichkeit, gleichzeitig zwei Phasen einzuschalten, wobei die Stromrichtung jeder Phase so eingestellt wird, dass sich der Motor in der gewünschten Richtung weiterdreht. Diese Betriebsart nennt sich „normal Mode“, was zeigt, dass es sich dabei um die normale

Betriebsart des Motors handelt. Der Vorteil dabei ist, dass der Motor mit einem geringeren Phasenstrom das gleiche Drehmoment wie im Wave Drive besitzt.

In beiden Fällen wird der Motor im Vollschritt betrieben. Das bedeutet, dass die Anzahl der Schritte pro Umdrehung durch die Anzahl der Rotor- und Statorpole des Motors vorgegeben ist.

2.2.5.3. Halbschritt

Im Halbschritt-Betrieb sind die Motorphasen so geschaltet, dass der Motor abwechselnd eine Vollschrittstellung, entsprechend seiner mechanischen Polzahl und danach eine Halbschrittstellung einnimmt. In der Halbschrittstellung steht der Rotor zwischen und in der Vollschrittstellung auf den mechanischen Polen. Im Halbschrittbetrieb verdoppelt sich also auf einfache Art die Anzahl der möglichen Schritte und damit die Auflösung des Motors. Ein Motor, der mechanisch über 200 Schritte verfügt, wird so zu einem Motor mit 400 Schritten.

Während im Vollschrittbetrieb immer durch beide Phasen der gleiche Strom fließt und sich nur die Stromrichtung ändert, wird bei Halbschrittbetrieb in der Vollschrittstellung des Rotors eine Phase komplett abgeschaltet. Das führt dazu, dass sich das Drehmoment des Motors mit jedem Schritt ändert, in der Halbschrittstellung hat der Motor dabei ein höheres Drehmoment als in der Vollschrittstellung.

Das ist natürlich in der Praxis unerwünscht, weil es zu unrundem Lauf und Vibrationen führt. Die Anhebung des Phasenstroms in der Vollschrittstellung oder eine Absenkung in der Halbschrittstellung sorgt dafür, dass diese Betriebsverhältnisse nicht eintreten.

In Abb. 29 sind die Verläufe der Phasenströme in den beiden Betriebsarten dargestellt. Beachten Sie dabei bitte besonders die Schritte S1, S3, S5 und S7 des Halbschrittbetriebs. Während die eine Phase abgeschaltet ist, erhält die andere Phase eine Stromanhe-

bung über den normalen Phasenstrom hinaus. Aus Gründen, die wir hier nicht weiter diskutieren wollen, wird nicht – wie eigentlich zu erwarten – der Phasenstrom auf das Doppelte angehoben, sondern nur um den Faktor 1,414 (die Quadratwurzel aus 2).

Im Halbschrittbetrieb erreichen die Motoren nicht ganz das Drehmoment des Vollschrittbetriebs. Allerdings hat der Halbschrittbetrieb nicht nur den Vorteil der höheren Auflösung, die Motoren laufen auch ruhiger und vibrationsärmer. Ob Halbschrittbetrieb in der konkreten Anwendung etwas bringt, lässt sich leicht ausprobieren: praktisch alle Steuerungen lassen sich für mindestens diese beiden Betriebsarten einstellen. Versuch macht klug!

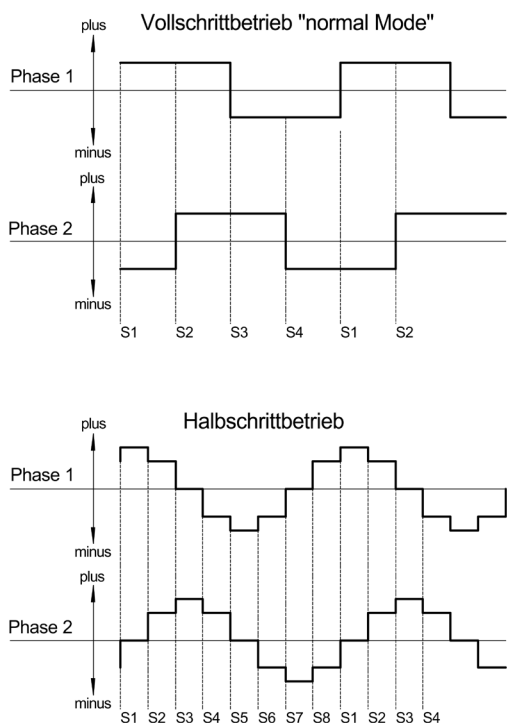


Abb. 29: Die Phasenströme eines Schrittmotors im Vollschrittbetrieb und im Halbschrittbetrieb mit Stromanhebung

2.2.5.4. Mikroschritt

Schrittmotoren sind aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht mit beliebig hoher Schrittzahl herstellbar. Es gibt aber Anwendungen, die aus Gründen der Positioniergenauigkeit oder um einen weicheren und vibrationsfreieren Motorlauf zu erzielen, nach höheren Auflösungen verlangen.

Deshalb wurde ein elektronisches Verfahren entwickelt, das, ähnlich wie beim Halbschrittbetrieb, den Rotor des Motors zusätzliche Positionen zwischen den mechanischen Polen einnehmen lässt. Damit sind bei einem Motor mit 200 mechanischen Schritten Auflösungen von 800, 1.600, 3.200 und mehr zu erzielen.

Allerdings ist meine Erfahrung, dass für das hier beschriebene Einsatzgebiet im Hobbybereich die Halbschrittansteuerung oder maximal die Viertelschrittansteuerung völlig ausreichend ist. So attraktiv die Mikroschrittansteuerung auch sein mag, sie hat für den Amateur auch einige Nachteile, als da sind:

- Geringeres Drehmoment der Motoren
- Nicht alle Motoren sind für Mikroschrittbetrieb optimal geeignet
- Der Steuercomputer ist möglicherweise nicht leistungsfähig genug, die nötige Schrittfrequenz zu erzeugen

2.2.6. Wicklungsausführungen

Die Wicklungen der Schrittmotoren unterscheiden sich einerseits durch die verwendete Drahtstärke und damit die Windungszahl, andererseits durch ihre Verschaltung. Ein möglicherweise günstig in eBay erworbener Schrittmotor kann durch die falsche Wicklungsausführung für den geplanten Einsatz unbrauchbar sein – kaufen Sie also nur, wenn wirklich alle relevanten Daten des Motors vom Verkäufer angegeben werden!

2.2.6.1. Wicklungen für den Betrieb mit konstanten Spannungen

Diese Wicklungen sind relativ hochohmig, um den Motorstrom zu begrenzen. Sie finden

sich nur in Motoren mit kleiner Leistung, die auf Spannungen von 5 V, 12 V oder 24 V ausgelegt sind. Die Ansteuerung ist einfach zu realisieren. Allerdings sind diese Motoren aufgrund ihrer geringen Leistung für unsere Zwecke nicht einsetzbar.

2.2.6.2. Wicklungen für den Betrieb mit konstanten Strömen

Motoren mit diesen Wicklungen sind sehr niederohmig ausgelegt. Der ohmsche Widerstand beträgt oft unter 1 Ω . Die Phasenströme, die in diesen Wicklungen fließen, bewegen sich im Bereich von 0,5 A bis über 20 A. Für unsere Zwecke sind Motoren mit Phasenströmen zwischen 1,5 A und 4 A optimal, da die gängigen Endstufenschaltungen Ströme von 2 A, 3 A oder 4-5 A verarbeiten können. Die Betriebsspannungen dieser Motoren werden meist zwischen 2 V und 8 V angegeben, wobei diese Angabe für uns keine besondere Bedeutung hat.

2.2.6.3. Motoren mit vier Anschlüssen

Dabei handelt es sich um bipolare Motoren, bei denen die einzelnen Wicklungen intern so geschaltet sind, dass sie nach außen nur noch zwei Anschlüsse pro Phase aufweisen. Auch wenn Sie für einen solchen Motor keinen Anschlussplan besitzen, können Sie die einzelnen Phasen leicht mit einem Ohmmeter identifizieren. Sollten Sie bei einer Phase die Anschlüsse vertauschen, läuft der Motor nur in der möglicherweise falschen Drehrichtung, ein Umstand, der sich über die Konfiguration der Steuersoftware korrigieren lässt.

2.2.6.4. Motoren mit sechs Anschlüssen

Unipolare Motoren besitzen vier Wicklungen, von denen jeweils zwei intern verbunden sind. Ein Ende jeder Wicklung sowie der Mittelabgriff sind herausgeführt, das ergibt sechs Anschlüsse.

Ein solcher Motor kann mit einer recht einfachen Steuerung betrieben werden. Allerdings haben solche Steuerungen für unse-

re Zwecke keine Bedeutung. Deshalb betreiben wir einen bipolaren Motor im unipolaren Modus, indem wir die vier Anschlüsse an den Enden der Wicklungen nutzen.

Die Wicklungen sind nicht so leicht zu identifizieren wie bei einem unipolaren Motor, dennoch brauchen Sie keinen Anschlussplan. Stellen Sie mit einem Ohmmeter erst einmal fest, welche drei Anschlüsse miteinander in Verbindung stehen. Dann messen Sie von einem Anschluss den Widerstand zu den zwei anderen Anschlüssen. Sind die Widerstandswerte gleich, dann haben Sie den Mittelabgriff identifiziert und die anderen beiden Anschlüsse sind die Enden der Wicklung. Genauso verfahren Sie mit den restlichen drei Anschlüssen. Bezüglich des Vertauschens der Anschlüsse gilt auch hier das oben gesagte.

2.2.6.5. Motoren mit acht Anschlüssen

Bei einem Motor mit acht Anschlüssen sind die Anschlüsse der Teilwicklungen beider Phasen einzeln herausgeführt.

Der Anwender hat somit die Freiheit, den Motor unipolar zu betreiben oder als bipolaren Motor mit parallel oder in Reihe geschalteten Wicklungen.

In unseren Anwendungen sollte der Motor bipolar mit parallel geschalteten Wicklungen betrieben werden. Der Grund dafür ist, dass der Motor in dieser Konfiguration für höhere Schrittfrequenzen als in der Reihenschaltung geeignet ist und eine höhere Dynamik entwickelt. Allerdings sind bei Parallelschaltung auch die Phasenströme höher, was bei der Auslegung der Steuerung berücksichtigt werden muss.

Für einen Motor mit acht Anschlüssen sollten Sie unbedingt einen Anschlussplan haben. Sie können zwar die einzelnen Wicklungen mit dem Ohmmeter identifizieren, wissen aber nicht, welche Wicklungen zueinander gehören. Wenn Sie Glück haben und Hersteller und Typenbezeichnung kennen, finden Sie möglicherweise auf der Internetseite des Herstellers einen Anschlussplan.

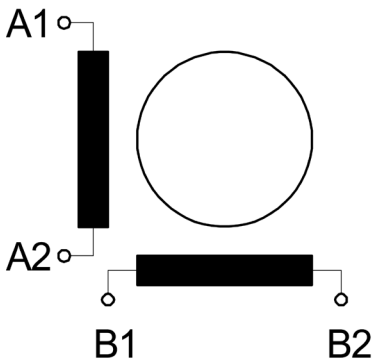


Abb. 30: Anschlussschema eines bipolaren Motors

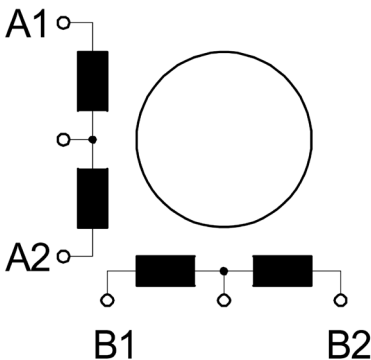


Abb. 31: Anschlussschema eines unipolaren Motors in bipolarer Schaltung

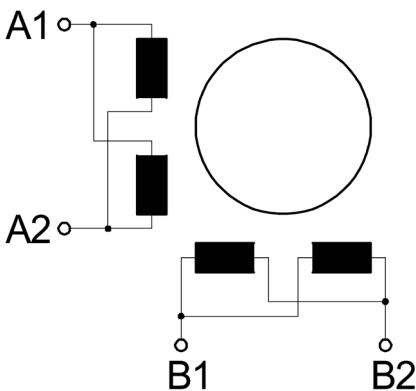


Abb. 32: Motor in bipolarer Parallelschaltung

2.2.6.6. Jede andere Anschlusszahl

Von Motoren, die eine andere als die oben beschriebene Anschlusszahl oder Anschlussbelegung haben, sollten Sie die Finger lassen. Es handelt sich vermutlich um Motoren mit fünf oder drei Phasen. Diese Motoren sind möglicherweise sehr gut zum Antrieb einer Werkzeugmaschine geeignet, allerdings gibt es am Markt dafür zurzeit keine preisgünstigen Steuerungen und auch der Selbstbau einer Steuerung gestaltet sich ziemlich aufwendig.

2.2.7. Warnung: Fremdantrieb des Schrittmotors

Wie fast jeder Elektromotor arbeitet auch ein von außen angetriebener Schrittmotor als Generator. Ein Antrieb von außen könnte zum Beispiel bei einer Fräsmaschine mit zusätzlichem Vorschubantrieb auftreten. Die durch den angetriebenen Schrittmotor erzeugte Spannung kann dabei so hoch werden, dass die Motor-Endstufen durchbrennen. Wenn Sie also vorhaben, einen Schrittmotor von außen anzutreiben, trennen Sie ihn vorher von der Steuerung! Der Motor lässt sich dadurch auch leichter drehen.

2.2.8. Kenngrößen eines Schrittmotors

Bei der Auswahl eines Schrittmotors sind Sie mit dessen Kenngrößen, den technischen Daten konfrontiert. Speziell, wenn Sie einen gebrauchten Motor oder einen Motor aus Industrie-Überbeständen kaufen, sollten Sie wissen, auf was Sie achten müssen.

2.2.8.1. Anzahl Phasen

Wenn Sie die in diesem Buch beschriebenen Steuerungen einsetzen oder nachbauen möchten, brauchen Sie Schrittmotoren mit zwei Phasen.

2.2.8.2. Schrittwinkel, Anzahl Schritte

Beim Schrittwinkel gilt: je kleiner, desto besser. Bei der Anzahl der Schritte ist demnach mehr natürlich besser. Allerdings wird die