Inhaltsverzeichnis

1 Stepper-Informationen **1**
1.1 Schrittmotorbetrieb . . . 1
1.2 Auswahl einer Stepper-Stromversorgung . . . 3
1.3 Resonanz . . . 3
1.4 Mikroschritte (engl. microstepping) . . . 4
1.5 Offener und geschlossener Regelkreis (engl. open and closed loop) . . . 5

2 Schrittmotor (Stepper-)Timing **6**

3 Beste Verdrahtungspraktiken **12**
3.1 Elektrisches Rauschen . . . 12
3.2 Masse, Erde und ”Common” . . . 12
3.3 Auswahl und Verwendung von Drähten . . . 12
3.3.1 Einzelleiter-Draht . . . 13
3.3.2 Abgeschirmtes Kabel . . . 13
3.4 AC-Netzspannung . . . 14
3.5 Netzteile . . . 14
3.5.1 AC-Erde . . . 14
3.5.2 Geteilter Gleichstrom . . . 15
3.6 Gleichstrom (engl. DC)-Einspeisungen . . . 15
3.7 Signalleitungen und Steuerleitungen . . . 15
3.8 Schritt- oder Servomotor-Treiber . . . 16
3.9 Frequenzumrichter . . . 16
3.10 Verlegung von Leitern . . . 16
3.10.1 Verlegung beweglicher Drähte . . . 16
3.10.2 Verlegung stationärer Drähte . . . 17
3.11 Mechanisches Rauschen . . . 17
3.11.1 Hardware Entprellung (engl. debouncing) . . . 17
3.11.2 Software-Debouncing . . . 18
3.12 Dokumentation . . . 18
3.12.1 Hardware-Dokumentation . . . 18
3.12.2 Schaltpläne . . . 18
3.12.3 Identifizierung der Verdrahtung . . . 18

Kapitel 1

Stepper-Informationen

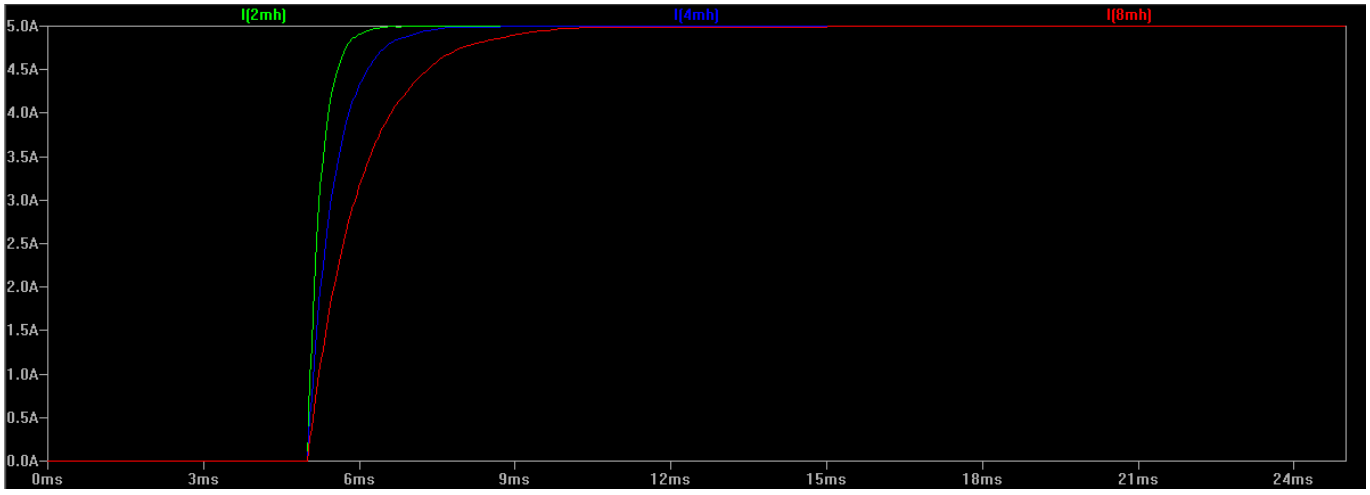
1.1 Schrittmotorbetrieb

Stepper motors operate by sequentially energising and de-energising several coils surrounding the rotor in such a way that the shaft is magnetically forced to rotate around in discrete steps. Steps of 0.9 - 1.8 degrees are quite common, giving 400 - 200 steps per full revolution of the shaft.

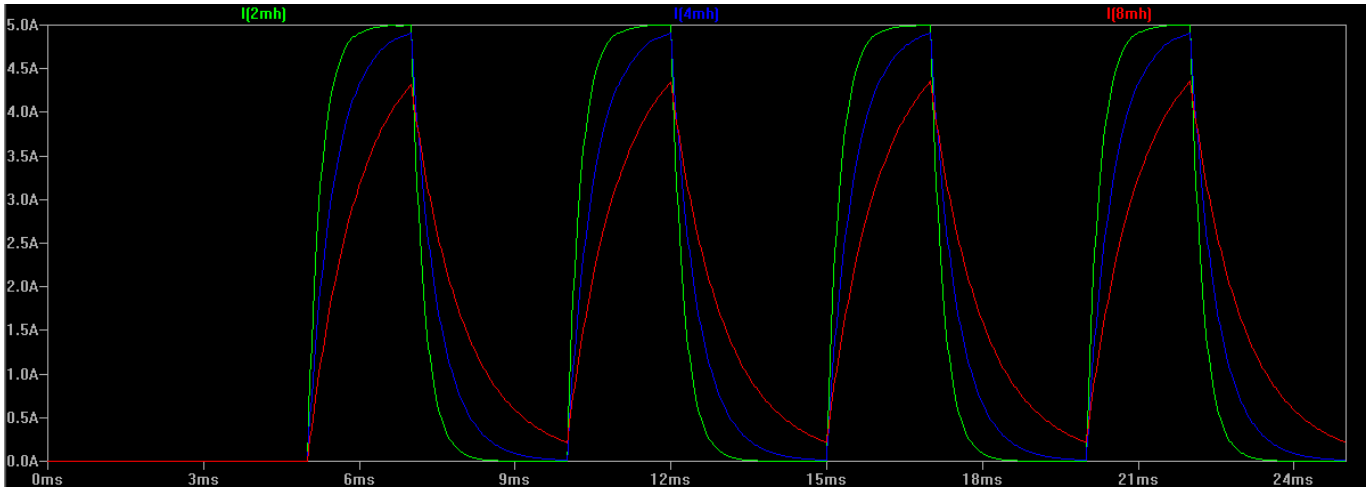
As in real life, nothing can change from one state to another with absolutely no time delay. In the case of the stepper motor, the current passing through each coil, and thus the magnetic field that pulls the rotor around to each step of rotation takes some time to take effect. This is due to the coil having inductance (expressed in Henries, abbreviated to the letter H) which has a natural tendency to resist the flow of a rapidly changing current. More coil inductance results in a slower rate of current change and thus a slower rate of magnetic field expansion and contraction.

The maximum torque that the stepper motor can achieve is when the motor is stationary with one winding energised. This figure may be quoted on a stepper motor datasheet as the *holding torque*. As the rate at which each coil is energised and de-energised increases to induce rotation in the shaft, the time that each coil can exert its full magnetic attraction on the rotor reduces, thereby reducing the overall torque. This relationship between speed and torque is largely inversely proportional.

In the below example, the charging time for three coils is shown when the applied voltage is stepped from 0 V to 40 V. While all three coils can easily reach the full current limit of 5 amps (A), the time taken varies for each coil. The 4 milli-Henry (mH) coil (blue trace) takes twice as long to reach full current than the 2 mH coil (green trace), and the 8 mH (red trace) coil takes twice as long again:

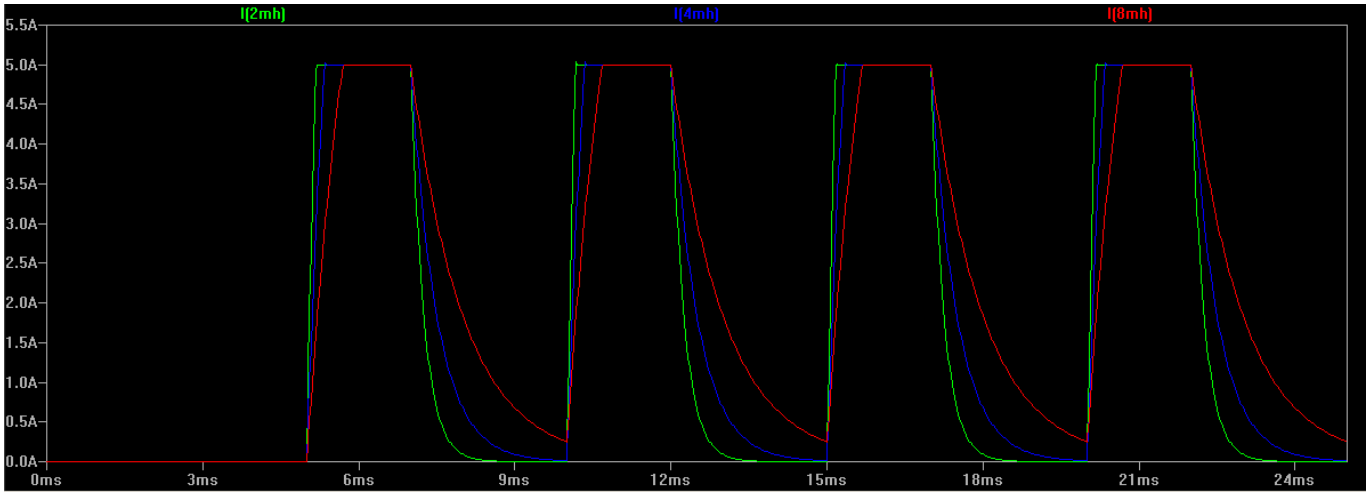


If the rate at which step changes are applied to the coils is significantly shorter than the rise time, it's easy to see that the winding has less time to attain full magnetic attraction on the rotor, and thus maximum torque is curtailed. In the below example the 2 mH coil can achieve the full 5 A limit before the step voltage is removed, but the 4 mH and 8 mH coils cannot:



The accepted way of improving motor speed while maintaining torque is to increase the speed at which the magnetic field of the motor coils can expand and collapse. The easiest way to accomplish this is to increase the supply voltage to force the current in each winding to rise and fall much more rapidly. A quicker magnetising time equates to faster step rates while improving torque at higher speeds, both of which are obviously desirable in a CNC system.

Using the same example as above, but increasing the step voltage to 80 V it can be seen that all three coils can now reach the 5 A maximum quite easily:



However, careful management of a higher drive voltage is required, as a higher voltage will increase current flowing in each coil with a corresponding increase in temperature of the winding. Excessive temperature rise in the winding will lead to eventual overheating and failure of the motor.

In most stepper-based CNC systems the voltage of the supply feeding the stepper driver is several orders of magnitude greater than the voltage of the motor itself. A typical NEMA23 stepper motor may have a rating of only a handful of volts, yet the power supply and driver could be operating at 48 VDC or more.

Nearly all modern stepper motor drivers on the market today are constant-current types. That is, the current being applied to each winding is fixed irrespective of how much voltage is being applied.

Most drivers accomplish this by monitoring the current being drawn through the motor windings and rapidly switching the outputs on and off at a very high frequency to maintain this current. Depending on the drivers being used, it may even be possible to hear this high frequency whistling in the motors themselves when stationary. Because the voltage is rapidly switched on and off to maintain the winding current at an approximate fixed value, these types of drivers are also known as *chopper drive*.

1.2 Auswahl einer Stepper-Stromversorgung

While a higher voltage is directly related to more speed and torque, obviously there comes a limit where increasing supply voltage is no longer beneficial. The first limitation to the maximum power supply voltage is likely to be what the stepper driver itself is capable of withstanding. This value should be provided in the datasheet for the stepper driver, and exceeding this voltage will result in the destruction of the driver. Ideally the power supply voltage should be chosen with a degree of headroom that falls under this maximum voltage limit of around 10%. If, for example a stepper driver has a V_{max} rating of 80 VDC, the maximum power supply voltage should be limited to 72 VDC.

As mentioned above, excessive motor supply voltage also leads to excessive heat rise in the motor windings, which can lead to eventual failure of the motor through overheating. A commonly used equation for providing a guideline in determining the maximum voltage to prevent excessive heat rise is to take the square-root of the winding inductance quoted in the motor datasheet (expressed in mill-Henries) and multiply by 32. For example, choosing a stepper with a coil inductance of 4 mH will result in a maximum power supply voltage of 32 x SQRT (4) = 64 VDC.

Many stepper motor datasheets will also provide speed/torque curves, often plotted using different supply voltages. By studying the graphs it may be determined that increasing the supply voltage by a factor of two will not result in a corresponding improvement in speed/torque by the same degree. If there is little to be gained in running a stepper motor at 64 VDC, this may help in narrowing down the proposed power supply to 32 VDC which will also help minimise excessive heat rise in the motor windings.

The other factor to consider is the current rating of the power supply. This is based from the motor’s winding current ratings and whether the motor windings are wired in series or parallel, both of which should be listed in the motor’s datasheet. A good rule of thumb is to size the power supply current rating at 2/3 of the rated phase current of the stepper motor if the windings are in parallel, or 1/3 of the rated current if wired in series. Thus, for a stepper motor rated at 4 A wired in parallel, the power supply needs to have a current rating of at least 2.7 A, or 1.3 A if wired in series. The total current rating of the complete system is then the sum of all stepper motors’ current requirements.

1.3 Resonanz

Motor resonance occurs when the rate at which the steps are applied to the windings matches the natural frequency of the motor itself. Applying steps for a prolonged period of time at this rate results in the torque dropping dramatically, and the motor may stall or even rotate in random directions. Some stepper motor datasheets provide plots of the torque/speed relationship and show a dip in the graph where resonance is likely to occur. It should be noted that this resonant peak provided in the datasheet is only for the motor itself - as soon as the motor is coupled to other components (i.e., installed in a CNC system) the resonant frequency may be altered, or even multiple new resonances introduced.

Es gibt mehrere Methoden, um die Auswirkungen der Resonanz zu kontrollieren, alle mit unterschiedlichem Grad an Komplexität, Wirksamkeit und Nebenwirkungen:

- Microstepping can help reduce resonance by using smaller step changes in current between each step. These smaller step changes cause less ringing in the motor and windings and thus cause less excitation at the point of resonance.

- Eine sehr einfache Methode zur Verringerung der Resonanz ist es, den Motor nie über einen längeren Zeitraum mit einer bestimmten Frequenz zu betreiben, sondern immer über die Resonanzspitze zu beschleunigen oder abzubremsen.
- Increasing inertial load will damp unwanted resonances at the expense of some torque and potentially some accuracy. Elastomeric motor mounts, shaft couplings or bearing mounts can be employed.
- More advanced stepper motor drives may have the ability to switch between stepping modes such that the resonant peak is managed at certain rates of operation. Other systems exist to place electrical load on the windings, which has a similar effect to mechanical damping, above.

1.4 Mikroschritte (engl. microstepping)

A stepper motor operating with each winding being fully energised in a sequential fashion is operating in full-step mode. That is, the maximum rotation resolution possible for that motor is the same as the number of whole steps that motor is manufactured to perform at (e.g., 200 steps per revolution for a 1.8 degree/step motor). As each winding is energised the rotor clocks around fully from one detent to the next.

Additional rotational resolution from a stepper motor can be obtained by performing microstepping, whereby the current being driven into each winding can essentially be *ramped* in discrete intermediate steps. This then causes the rotor to gradually straddle across each rotational detent rather than making the full jump from one step to the next.

Microstepping is commonly performed in multiples of 2 (4x, 8x, 16x, 32x etc). For example, a drive set to 4x microstepping will divide each step into four discrete current levels in the motor windings, thus affording an improvement in rotational resolution by a factor of four. This obviously means that for a typical step/direction control interface there will need to be four times as many step pulses generated to make the motor move the same amount had it been operating in full-step mode. To make the motor rotate at the same speed the rate at which pulses need to be applied to the drive also needs to be four times as fast.

At low rotational speeds, microstepping actually results in slightly higher torque than when full stepping. This is due to the smaller changes in current between intermediate steps resulting in less energy being wasted exciting natural resonances in the motor. As RPM increases however, torque tends to fall off at a similar rate as full stepping.

However, continuing to increase the degree of microstepping will eventually lead to some real-life limitations. Step pulse generation, particularly when using the parallel port, is limited in frequency. This will inevitably limit the maximum speed at which the drive can be commanded to step at. With high degrees of microstepping this will result in unacceptably slow RPM of the motor.

Excessively-high rates of microstepping have no real benefit if the resultant accuracy is too small to be mechanically useful. A 1.8 degree per step motor running at 16x microstepping is theoretically capable of 0.1125 degrees per step. Coupled with a 20 TPI leadscrew this should result in a positional resolution of 0.000016” or 0.0004 mm. In reality it is incredibly difficult to achieve such fine degrees of control. All components in the CNC system will contain tolerances and countering forces (backlash in leadscrews, flex in gantries, runout in the spindle and cutting tool, static friction in the stepper motor itself, stepper detent error , etc.) that will render such small amounts of resolution completely meaningless. In practice, microstepping at rates in excess of 4x or 8x on a CNC machine fitted with leadscrews serves little purpose. In some cases it may even be more beneficial to run at lower degrees of microstepping or even full steps, and operate the stepper motor through a gear reduction to obtain the necessary resolution and torque gains.

1.5 Offener und geschlossener Regelkreis (engl. open and closed loop)

In the simplest CNC systems employing stepper motors, the host computer and/or stepper driver receives no feedback from the motor that it has achieved the desired outcome when commanded to begin stepping. The assumption by the software, driver and end user is that the motor operated correctly and the axis has moved to the expected new position. A system operating in this fashion is said to be running in *open loop*, where the device at the end of the signal chain (the stepper motor) does not provide any indication to the device at the start of the chain (the computer) that the target was reached.

A further enhancement to the basic stepper motor is to run the system in a *closed loop*. This is achieved by equipping the stepper motor with a rotary encoder whose positional signal is returned back to a device higher up in the signal chain. In this way the motors' actual position can be compared to the expected position at all times, and the drive parameters adjusted in real time to ensure that the motor does not fall behind. This enables closed loop stepper systems to be able to achieve better speed and torque performance than open loop systems, due to the system constantly compensating for any deviation to the stepper's performance under varying loads.

Basic systems operating in this fashion may only close the loop between the motor and the driver, leaving the software on the host computer out of the loop. The software issues step/direction pulses to the downstream driver as it would normally when running in open loop. In these situations the drivers usually include an alarm output which signals the software to halt when the load placed on the stepper becomes too great for the driver to compensate without losing steps.

Fortschrittlichere Implementierungen des Closed-Loop-Betriebs bringen das Encodersignal den ganzen Weg zurück zum Host-Computer, erfordern aber einen viel höheren Hardware- und Software-Overhead, um das Encoder-Feedback und die Berechnung und Bereitstellung der Antriebskompensation zu verwalten.

Kapitel 2

Schrittmotor (Stepper-)Timing

Diese Seite befasst sich mit der Schritt- und Richtungssteuerung von Schrittmotoren.

Bitte ergänzen Sie diese Liste im Format des Stepconf-Assistenten und in Nanosekunden, damit sie einheitlich ist.

Einige Boards haben bekannte Probleme, siehe die Seite Hardware-Fehlerbehebung

Wenn Sie sich unsicher sind, was Ihr Timing angeht, fangen Sie mit einem hohen Wert an, z. B. 10000 für jeden und testen Sie. Deshalb müssen Sie die Timings für eine Treiberplatine kennen, nicht nur den Schrittübersetzer-Chip, der enthalten ist.

Beachten Sie auch, dass einige Controller auf die fallende Kante treten, einige auf die steigende Kante. Dies ist wichtig, da es das Timing ändert und schwer zu verfolgen sein wird. Stellen Sie sicher, dass LinuxCNC dem entspricht, was der Controller erwartet.

Hinweis 1: Steht ein Sternchen vor dem Namen, sind die Werte nicht bestätigt. Wenn Sie die Werte bestätigen können, tun Sie dies bitte…

Die Zeiten sind in Nanosekunden (ns) angegeben. Multiplizieren Sie Mikrosekunden (us) mit 1000, um Nanosekunden (ns) zu erhalten.

Hersteller	Modell	Schrittzeit	Schwittwerk	Richtung Halten	Richtungsstapellung	Stapellung on	Datenblatt	
Chinese Blue Boards	TB6560 CNC-Schrittmotor-Treiber Steuer-platine	150000	150000	150000	150000	Fallende Flanke	http://hyu68.com/-cp8.htm	
Gecko	201	500	4000	20000	1000	Fallende Flanke	http://www.geckodrive.com support/-motor-control-manuals/-stepper-drives/-g201-rev-16.html	

Hersteller	Modell	Schrittzeit	Schwittwerk	Richtung Halten	Richtungssetup	Stapellung	Datenblatt	
Gecko	202	500	4500	20000	1000	Fallende Flanke	http://www.geckodrive.com/support/-motor-control-manuals/-stepper-drives/-g202-rev-15.html	
Gecko	203v	1000	2000	200	200	Steigende Flanke	http://www.geckodrive.com/support/-motor-control-manuals/-stepper-drives/-g203v-rev-7.html	
Gecko	201x	500	3000	20000	1000	Fallende Flanke	http://www.geckodrive.com/support/-motor-control-manuals/-stepper-drives/-g201-rev-16.html	
Gecko	212	500	4000	20000	1000	Fallende Flanke	http://www.geckodrive.com/support/-motor-control-manuals/-stepper-drives/-g212-rev-15.html	
Gecko	213v	2000	1000	200	200	Steigende Flanke	http://www.geckodrive.com/support/-motor-control-manuals/-stepper-drives/-g213v-rev-7.html	

Hersteller	Modell	Schrittzeit	Schwittwerte	Richtung Halten	Richtungssetup	Stapellung	Datenblatt
Gecko	320	3500	500	200	200	Steigende Flanke	http://www.geckodrive.com/support/-motor-control-manuals/-dc-servo-drives/-g320-rev-7.html
Gecko	320x	1000	2500	200	200	Steigende Flanke	http://www.geckodrive.com/support/-motor-control-manuals/-dc-servo-drives/-g320x-rev-10.html
Granite Devices	VSD-E/XE Evolution	125	125	125	125	Steigende Flanke	http://granitedevices.fi/-assets/-files/-vsd-e_160_manual.pdf
Granite Devices	VSD-E/XE DualDC	150	1850	150	800	Steigende Flanke	http://granitedevices.fi/-assets/-files/-vsd-e_160_dualdc_manual.pdf
JVL	SMD41	500	500	2500	2500	Steigende Flanke	http://www.jvl.dk/-files/-pdf/-lb043gb.pdf
JVL	SMD42	500	500	2500	2500	Steigende Flanke	http://www.jvl.dk/-files/-pdf/-lb043gb.pdf
Linistepper Open Source	RULMS1	30000	100000	4000	4000	Steigende Flanke	http://www.piclist.com/-techref/-io/-stepper/-linistep/-index.htm
Linistepper Open Source	THB6064	2300	2300	4600	1000	Steigende Flanke	http://www.piclist.com/-techref/-io/-stepper/-THB6064/-index.htm

Hersteller	Modell	Schrittzeit	Schwittwerte	Richtung Halten	Richtungssteuerung	Stapellung	Datenblatt
*Motion Control	MSD542	>1500	2000	2000	2000	Steigende Flanke	http://www.motioncontrolpro.c2/-uploads/-msd542%20datasheet.pdf
Parker	OEM750	200	300	0	200000	Steigende Flanke	http://www.compumotor.com/-manuals/-OEM750/-OEM750_Entire_Rev_B.pdf
ST	L297	?	500	4000	1000	Steigende Flanke	http://www.st.com/-stonline/-books/-pdf/-docs/-1334.pdf
Xylotex	XS-3525/8S-3	2000	1000	200	200	Steigende Flanke	http://www.xylotex.com/-XS3525V202.pdf
Xylotex	XS-3525/8S-4	1000	1000	200	200	Steigende Flanke	http://www.xylotex.com/-XS3525V400.pdf
Lin Engi-neering	Silverpak 17D/DE	20000	20000	200	200	Steigende Flanke	http://www.linengineering.com/-site/-products/-pdf/-SilverPak17D_DE-manual.pdf
Hobbycnc	Pro Chop-per Board	2000	2000	2000	2000	?	http://www.hobbycnc.com/-products/-hobbycnc-pro-chopper-driver-board-kits/
*Routout	2,5-Ampere-Schrittmachertreiber	200	1000	1000	?	?	http://www.routoutcnc.com/-2-5ampdriver.pdf
*Intelligent Motion System	IM483	1000	1000	1000	1000	Steigende Flanke	http://www.imshome.com/-im483.html
Keling	4030	5000	5000	20000	20000	?	http://www.
Keling	6852	1750	1750	10000	10000	Steigende Flanke	http://www.kelinginc.net/-kL-6852.pdf
Sherline	8760	1000	6000	24000	24000	?	https://www.sherline.com/-
Burkhard Lewetz	Step3S	6000	15000	?	5000	?	http://www.lewetz.de/-download/-ibstep3se.pdf
Parker Compu-motor	Zeta 4	200	200	?(200)	?(200)	Steigende Flanke	http://www.compumotor.com/-manuals/-ZETA/-ZETA_Rev_A_Entire.pdf

Hersteller	Modell	Schrittzeit	Schwittwerte	Richtung Halten	Richtungssetup	Stapellung	Datenblatt
www.cncdrive.com	Dugong	1000	2500	1000	1000	?	http://www.cncdrive.com/-content/-dugong.htm
www.cncdrive.com	DG2S-08020	1000	2500	1000	1000	?	http://cncdrive.com/-DG2S_08020.html
Wantai Motors	DQ542MA	5050	5050	500	500	?	http://www.wantmotor.com/ProductsView.asp?id=257&
Leadshine USA	Digital DM422 40V 2.2A	7500	7500	20000	5000	Steigende Flanke	http://leadshineusa.com/-UploadFile/-Down/-DM422m.pdf
Leadshine USA	Digital DM556 50V 5,6A	2500	2500	10000	5000	Steigende Flanke	http://leadshineusa.com/-UploadFile/-Down/-DM556m.pdf
Leadshine USA	Digital DM856 80V 7,0A	2500	2500	10000	5000	Steigende Flanke	http://leadshineusa.com/-UploadFile/-Down/-DM856m.pdf
Leadshine USA	Digital DM870 80V 7,0A	2500	2500	10000	5000	Steigende Flanke	http://leadshineusa.com/-UploadFile/-Down/-DM870m.pdf
Leadshine USA	Digital DM1182 150VAC 8,2A	2500	2500	10000	5000	Steigende Flanke	http://leadshine.com/-UploadFile/-Down/-DM1182m.pdf
Leadshine USA	Digital EM402 40V 2,2A	10000	2500	10000	5000	Steigende Flanke	http://leadshine.com/-UploadFile/-Down/-EM402d_P.pdf
Leadshine USA	Digital EM503 50V 4,2A	2500	2500	10000	5000	Steigende Flanke	http://leadshine.com/-UploadFile/-Down/-EM503d_P.pdf
Leadshine USA	Digital EM705 70V 7,0A	2500	2500	10000	5000	Steigende Flanke	http://leadshine.com/-UploadFile/-Down/-EM705d_P.pdf
Leadshine USA	Digital EM806 80V 8,2A	2500	2500	10000	5000	Steigende Flanke	http://leadshine.com/-UploadFile/-Down/-EM806d_P.pdf
Leadshine USA	Analog M415B 40V 1,5A	1500	1500	8000	5000	Steigende Flanke	http://leadshineusa.com/-UploadFile/-Down/-M415Bm.pdf
Leadshine USA	Analog M542 50V 4,2A	1500	1500	8000	5000	Steigende Flanke	http://leadshineusa.com/-UploadFile/-Down/-M542V2m.pdf
Leadshine USA	Analog M752 75V 5,2A	1500	1500	8000	5000	Steigende Flanke	http://leadshineusa.com/-UploadFile/-Down/-M752m.pdf

Hersteller	Modell	Schrittzeit	Schwittwerk	Richtung Halten	Richtungssetup	Stapellung	Datenblatt
Leadshine USA	Analog M880A 80V 7,8A	1500	1500	8000	5000	Steigende Flanke	http://leadshineusa.com/-UploadFile/-Down/-M880Am.pdf
Leadshine USA	Analog M860H 80VAC 7,2A	1500	1500	8000	5000	Steigende Flanke	http://leadshineusa.com/-UploadFile/-Down/-MA860Hm.pdf
Leadshine USA	Brushed servo DCS303 30V 15A	2500	2500	10000	5000	Steigende Flanke	http://leadshineusa.com/-UploadFile/-Down/-DCS303m.pdf
Leadshine USA	Brushed servo DCS810 80V 20A	2500	2500	10000	5000	Steigende Flanke	http://leadshineusa.com/-UploadFile/-Down/-DCS810V1m.pdf
Leadshine USA	Brushed servo DCS810S 80V 20A	1000	1000	7000	5000	Steigende Flanke	http://leadshineusa.com/-UploadFile/-Down/-DCS810Sm.pdf
Leadshine USA	Brushless servo ACS306 30V 15A	2500	2500	10000	5000	Steigende Flanke	http://leadshine.com/-UploadFile/-Down/-ACS306hm.pdf
Leadshine USA	Brushless servo ACS606 60V 15A	850	850	6700	5000	Steigende Flanke	http://leadshineusa.com/-UploadFile/-Down/-ACS606m.pdf
Leadshine USA	Brushless servo ACS806 80V 20A	850	850	6700	5000	Steigende Flanke	http://leadshineusa.com/-UploadFile/-Down/-ACS806m.pdf
Pololu	A4988 Schrittmotor-Treiber Carrier (engl. Stepper Motor Driver Carrier)	1000	1000	200	200	Steigende Flanke	http://www.pololu.com/-catalog/-product/-1182/
Pololu	DRV8825 Stepper Motor Driver Carrier	1900	1900	650	650	Steigende Flanke	http://www.pololu.com/-catalog/-product/-2132/
cnc4you		2000	8000	5000	5000	Steigende Flanke	http://cnc4you.co.uk/-resources/-CW5045.pdf

Kapitel 3

Beste Verdrahtungspraktiken

3.1 Elektrisches Rauschen

Elektrisches Rauschen in einem System wird durch elektromagnetische Interferenz (EMI) verursacht, bei der Signale, die in einem Stromkreis auftreten, einen benachbarten Stromkreis stören, entweder durch elektromagnetische Induktion, elektrostatische Kopplung oder Leitung. EMI kann Probleme beim täglichen Betrieb einer CNC-Maschine verursachen und sich auf verschiedene Weise äußern, z. B. durch falsches Auslösen von Endschaltern, vorzeitig unterbrochene Werkzeugantastungen, Beschädigung einer seriellen Datenverbindung zu einem VFD oder fehlerhaftes Verhalten der CNC-Steuerungssysteme und -Software.

Wenn Strom durch einen Leiter fließt, wird ein Magnetfeld erzeugt. Wenn der Strom zunimmt, wird das Magnetfeld stärker und bricht wieder zusammen, wenn der Strom aufhört zu fließen. Wenn dieses magnetische Wechselfeld zufällig einen anderen Leiter kreuzt, kann es in diesem eine unerwünschte Spannung induzieren, die sich als Rauschen bemerkbar macht.

Es gibt verschiedene Methoden, um die Auswirkungen von EMI in einem elektrischen System zu minimieren. Am wirksamsten ist es natürlich, das Auftreten von Störungen von vornherein zu verhindern. In der Praxis besteht die Methode zur Kontrolle der Auswirkungen von EMI in der Regel darin, Maßnahmen zu ergreifen, die verhindern, dass das Rauschen die gewünschten Signale im CNC-System verunreinigt.

3.2 Masse, Erde und ”Common”

Bei der Verwendung von Begriffen wie Erde und Masse kann es zu Verwechslungen kommen. In manchen Fällen bezeichnen sie dasselbe, nämlich den Punkt in einem elektrischen System, auf den sich alle Spannungen beziehen. Für die Zwecke dieses Artikels beziehen sich die Begriffe ”Erde” und ”Masse” auf den Punkt, an dem die eingehende Netzversorgung geerdet ist, während ”common” der Rück- oder Minuspol einer Gleichstromversorgung ist. In einigen Fällen ist es zulässig, die Masse einer Gleichstromversorgung zu erden, wodurch der Minuspol dieser Versorgung das gleiche Potenzial erhält wie die ankommende Wechselstrommasse, aber für die Zwecke dieser Diskussion müssen die Begriffe ”Erde”/”Masse” von ”common” getrennt werden, um Verwechslungen zu vermeiden.

3.3 Auswahl und Verwendung von Drähten

Kabel gibt es in vielen Arten, Größen und Konfigurationen. Sich durch all die verfügbaren Kabel zu wühlen, ist eine monumentale Aufgabe für sich, aber für die Zwecke dieses Artikels ist es nur notwendig, die Arten von Kabeln zu betrachten, die typischerweise bei der Verdrahtung einer CNC-Steuerung

verwendet werden. Darüber hinaus kann die Art und Weise, wie das Kabel verwendet wird, einen gewissen Einfluss auf das Gesamtsystem haben. Im Folgenden finden Sie einige Tipps, die sich als hilfreich erweisen könnten.

3.3.1 Einzelleiter-Draht

Drähte gibt es in zwei Formen: Volldraht und Litzendraht. Massivdraht ist im Allgemeinen billiger als Litze, kann aber bei Anwendungen, bei denen wiederholtes Biegen zu erwarten ist, eher brechen. Glücklicherweise bedeutet die weite Verbreitung von Litzen auf dem Markt, dass ihre Verwendung wo immer möglich gefördert werden sollte.

Drähte sollten so angeschlossen werden, dass alle Litzen des Leiters sauber und sicher in der passenden Buchse sitzen. Dies kann erreicht werden, indem die Litzen vor dem Einführen in den Anschluss zusammengedreht werden oder indem eine Pressklemme, wie z. B. ein Spaten oder ein Kabelschuh, verwendet wird. Es sollte darauf geachtet werden, dass keine Litzen außerhalb des Anschlusses enden, um einen versehentlichen Kurzschluss mit benachbarten Anschlüssen zu vermeiden.

Vermeiden Sie es, die Litzen vor dem Crimpen zusammenzulöten, wenn Sie den blanken Draht mit einem Kompressionscrimp versehen. Das Crimpen des Kabelschuhs auf einen gelöteten Draht kann dazu führen, dass sich der Kabelschuh mit der Zeit lockert, da die gelöteten Litzen nach dem Anbringen des Crimps ihre Kompressibilität verlieren. Aus demselben Grund sollte gelöteter Draht nicht in einer Anschlussleiste installiert werden, da dann der Schraubbolzen beim Anziehen direkt auf den Draht drückt.

Wenn Sie das Kabel für einen Anschluss abisolieren, entfernen Sie nur so viel, wie nötig ist, um den Anschluss nach Fertigstellung abzudecken. Wenn Sie zu viel Isolierung abisolieren, wird ein Teil des Kabels freigelegt, an dem ein Kurzschluss entstehen kann.

Der Stromkreis, für den das Kabel bestimmt ist, sollte ebenfalls berücksichtigt werden; die Spannung im Stromkreis, und die Stromstärke, die er überträgt, haben einen Einfluss auf die Wahl des zu verwendenden Kabels. Die dünne Isolierung eines recycelten CAT5-Ethernetkabels reicht nicht aus, um den Spannungen standzuhalten, die an den Ausgangsklemmen eines Frequenzumrichters auftreten können, und auch der Querschnitt des Leiters reicht nicht aus, um mehrere Ampere Strom zu führen, ohne dass es zu einer Überhitzung und damit zu einem Brand kommen kann. Umgekehrt ist es zwar durchaus zulässig, einen Endschalterstromkreis mit einem 2,5-mm-Kabel zu verdrahten, doch führt dies zu einer unnötigen Verdichtung des Kabelbaums. In der Dokumentation des Herstellers und in den Vorschriften für die elektrische Verdrahtung Ihres Landes finden Sie die empfohlenen Mindestquerschnitte für die Leistungs- und Steueranforderungen.

3.3.2 Abgeschirmtes Kabel

Es gibt zwei Arten von abgeschirmten Kabeln. Die eine hat ein blankes Drahtgeflecht, das den Draht im Inneren umgibt, und die andere hat eine Metallfolie, die den Draht im Inneren umgibt. Die Wahl des abgeschirmten Kabels hängt davon ab, wie stark das Rauschen ist, das Sie bekämpfen wollen.

Foliengeschirmter Draht Foliengeschirmte Kabel bestehen aus einer dünnen Aluminium- oder Kupferfolie, die in der Regel mit einer Kunststofffolie verbunden ist, die das Kabel umgibt. Der umschlossene Draht ist in der Regel zu 100 % abgedeckt. Die Befestigung der Folie an der Erde kann schwierig sein, vor allem, wenn die Folie aus Aluminium besteht oder auf ein Kunststoffträgermaterial laminiert ist. Aus diesem Grund ist es üblich, dass im Kabel eine blanke Metalllitze eingeschlossen ist, die über die gesamte Länge des Kabels mit der Folie in Kontakt steht. Diese wird als Erdungsdraht bezeichnet und dient dazu, die Verbindung zur Erde herzustellen.

Geflochtener abgeschirmter Draht Geflechtgeschirmte Kabel werden von einem geflochtenes Kupfergeflecht umgeben. Es ist sperriger als Folie und bietet keine 100%ige Abdeckung, ist aber flexibler als foliengeschirmte Typen. Der Abdeckungsgrad beträgt in der Regel 70 % bis 95 %, je nachdem, wie dicht das Geflecht konstruiert wurde. Trotz des geringeren Abdeckungsgrades ist die Effektivität

einer Geflechtabschirmung größer als die einer Folienabschirmung, da das Geflecht mehr Volumen hat und Kupfer ein besserer Leiter als Aluminium ist.

Für elektromagnetisch sehr verrauschte Umgebungen kann eine weitere Teilmenge der beiden oben genannten Abschirmmethoden verwendet werden, wobei sowohl Geflecht- als auch Folienabschirmung gleichzeitig verwendet werden. Einzelne Drähte in einem Mehrleiterkabel können ebenfalls abgeschirmt werden, wobei eine Gesamtabschirmung auf den gesamten Kabelmantel aufgebracht wird.

3.4 AC-Netzspannung

Der eingehende Netzwechselstrom, der das CNC-System versorgt, kann Störungen aufnehmen und in die Stromversorgungen und andere Geräte übertragen. Wird das eingehende Netz beispielsweise auch für die Versorgung großer Motoren verwendet, kann auf der Leitung zur Versorgung der CNC-Komponenten elektrisches Rauschen erzeugt werden. Obwohl die meisten modernen elektronischen Geräte über eine eingebaute Netzfilterung verfügen, um die Anfälligkeit für netzbedingte Störungen zu minimieren, kann die kundenspezifische und modulare Beschaffenheit eines CNC-Systems bedeuten, dass die verwendeten Komponenten aus einer Vielzahl von Quellen mit unterschiedlichem Grad an inhärenter Störungsimmunität stammen.

Inline-Filter können in der eingehenden Netzversorgung des CNC-Steuerungssystems installiert werden, um induzierte Störungen zu reduzieren. Der Betrieb des CNC-Systems an einem anderen Netzstromkreis als alle größeren elektrischen Störquellen kann ebenfalls dazu beitragen, mögliche Quellen von Netzstörungen zu minimieren.

Anmerkung
Beachten Sie, dass in vielen Ländern die Installation und Änderung von Netzstromkreisen nur von lizenzierten Elektrikern durchgeführt werden darf.

3.5 Netzteile

3.5.1 AC-Erde

Eine typische CNC-Maschine kann mehrere verschiedene Stromversorgungseinheiten (PSUs) im System installiert haben. Jedes Gerät, das über das eingehende Netz mit Strom versorgt wird und geerdet werden soll, muss ordnungsgemäß und dauerhaft an die Netzerde angeschlossen werden. Idealerweise sollte dies am gleichen Punkt im System erfolgen, z. B. an einem Gewindepfosten oder -bolzen, einem Kupfer-/Messing-Abschlussstreifen oder einer großen metallischen Montageplatte innerhalb des Steuergehäuses.

Die in CNC-Systemen weit verbreiteten Hochfrequenz-Schaltnetzteile erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass HF-Störungen von ihnen in benachbarte Schaltkreise eingekoppelt werden. Viele dieser Netzteile haben ein Metallgehäuse, das, wenn es mit der Netzerde verbunden ist, dazu beiträgt, die Einkopplung von Hochfrequenz-EMI in andere elektrische Komponenten zu verhindern.

Aus Sicherheitsgründen ist es wichtig, dass diese Netzerdungsverbindungen auch mechanisch stabil sind und sich nicht lösen können, und dass der verwendete Draht einen ausreichenden Querschnitt hat, um im Falle eines Erdschlusses den zu erwartenden Fehlerstrom zu übertragen. Es ist auch zwingend erforderlich, dass die Netzerde niemals als stromführender Leiter für andere Komponenten im System verwendet wird. Die Erde darf nur für einen einzigen Zweck verwendet werden: die Sicherheitserdung.

Beachten Sie auch, dass die Farbe der Ummantelung, die für den Anschluss an die Erde verwendet wird, durch die Verdrahtungsvorschriften Ihres Landes vorgeschrieben sein kann, und dass die Leitung anderer, nicht verwandter Signale in der gleichen Kabelfarbe verboten sein kann.

3.5.2 Geteilter Gleichstrom

Die gemeinsame Nutzung eines DC-Netzteils hängt in gewissem Maße von den elektrischen Betriebsanforderungen des CNC-Systems ab. Beispielsweise kann ein Schrittmotortreiber, der mit einer 24 VDC-Motorspeisung und einer 5 V-Logikspeisung arbeitet, über optisch isolierte Signaleingangsleitungen verfügen, die eine vollständige elektrische Trennung der Eingangs- und Ausgangsschaltungen des Treibers aus Sicherheits- und Störsicherheitsgründen gewährleisten. Die Verbindung von Schrittmotor und Logikversorgung kann sich in diesem Fall nachteilig auf den Betrieb des Systems auswirken.

Im Allgemeinen ist es am sinnvollsten, die gemeinsamen Punkte der verschiedenen im CNC-System verwendeten Gleichstrom-Netzteile voneinander und von der Wechselstrom-Netzerde getrennt zu halten, es sei denn, es besteht eine besondere Anforderung, sie miteinander zu verbinden. In den meisten Fällen werden die gemeinsamen Punkte der Hochleistungs-Stromversorgungsabschnitte des CNC-Systems (z. B. Schrittmotor- oder Servomotortreiber, Spindelmotoren usw.) von den gemeinsamen Punkten der elektrisch empfindlichen Abschnitte der CNC (Steuerschnittstellenplatinen, Endschalter, Werkzeugtasterschaltungen usw.) getrennt, um eine gegenseitige Verschmutzung der beiden Systeme zu verhindern.

Sollte es notwendig sein, mehrere gemeinsame Punkte verschiedener Netzteile miteinander zu verbinden oder einen gemeinsamen Punkt eines Netzteils mit der AC-Haupterde zu verbinden, so sollte dies nur an einem einzigen Punkt und so nahe wie möglich an der gemeinsamen Klemme der Netzteile geschehen.

Bei CNC-Maschinen, bei denen die Hardwaretreiber und Schnittstellenschaltungen bereits vormontiert sind, wird dem Endanwender die Entscheidung darüber, welche Gleichstromanschlüsse wo angeschlossen werden, in der Regel abgenommen.

3.6 Gleichstrom (engl. DC)-Einspeisungen

In Situationen, in denen ein Gleichstromkreis mit einem von der Netzerde getrennten gemeinsamen Punkt betrieben wird (d. h. die Versorgung ist ”erdfrei”), kann es hilfreich sein, Gleichstromversorgungen mit verdrillten Leitungspaaren zu betreiben, wobei jedes Leitungspaar im Stromkreis (z. B. die Plus- und Minusleitungen) physisch in einem Helixmuster miteinander verdrillt ist. Durch die Verdrillung der Drähte teilen sich die beiden Leiter so eng wie möglich denselben ”Grundbesitz”. Jegliche EMI, die über sie hinweggeht, wird daher weitgehend ausgelöscht, da beide Leiter das gleiche Maß an EMI erhalten. Für zusätzlichen Schutz verwenden Sie verdrillte Kabel, die in einem abgeschirmten Mantel untergebracht sind und deren Abschirmung mit der Netzerde verbunden ist.

Es ist jedoch zu beachten, dass verdrillte Adernpaare die Auswirkungen von EMI weniger wirksam bekämpfen, wenn eine der beiden Adern mit der Netzerde verbunden ist, da der Leiter auf Erdpotential weniger durch EMI beeinflusst werden kann als der ungeerdete Leiter. In diesen Fällen hat die Verdrillung der Drähte weniger Einfluss auf die gesamte Störfestigkeit, und abgeschirmte Kabel sind von Natur aus effektiver bei der Verringerung der Störaufnahme.

3.7 Signalleitungen und Steuerleitungen

Die Drähte, die zur Übertragung von Logiksignalen zu und von verschiedenen Peripheriegeräten in der CNC verwendet werden (z. B. Eingänge der Schrittmotorsteuerung, Achsenendschalter usw.), sind am anfälligsten für Rauschstörungen. Der Grund dafür sind die niedrigen Spannungen, die zur Übertragung der Informationen verwendet werden. Wenn ein Endschalter oder ein Home-Schalter betätigt wird oder ein Werkzeugmesstaster einen Kontakt hergestellt oder unterbrochen hat, wird dieses Signal verwendet, um zu signalisieren, dass das Ereignis stattgefunden hat. In der Regel geschieht dies über Eingangsstifte an der Computerschnittstellenkarte oder am Parallelport, die je nach

Anwendung mit nur 3,3 V signalisiert werden können. Offensichtlich kann eine 2-V-Rauschspitze die Gültigkeit eines Signals verfälschen, wenn der Nutzbereich nur 0-3,3 V beträgt.

Wenn möglich, isolieren Sie den gemeinsamen Punkt des Netzteils, das die logischen Peripheriegeräte versorgt, vom Rest des Systems. Wenn z. B. der gemeinsame Punkt des Niederspannungsnetzteils vom gemeinsamen Punkt der Schrittmotorversorgung isoliert ist, verringert sich die Gefahr, dass große Ströme in der Rückleitung des Schrittmotors den gemeinsamen Punkt der Niederspannungsversorgung verunreinigen.

Verwendet das Steuergerät eine Differenzialsignalisierung, so sind verdrillte Kabelpaare für die Übertragung des Signals zu verwenden. Abgeschirmte Kabel sind zu bevorzugen, wenn die Steuerleitungen unsymmetrisch sind oder wenn die zu überbrückenden Entfernungen lang sind oder durch elektrisch ungünstige Umgebungen führen. Wenn Sie die Abschirmung im Kabel erden, schließen Sie es an die Netzerde an.

Wenn die Steuerung und die Schnittstellengeräte höheren Steuersignalen standhalten können, sollten Sie die Verdrahtung und die Anforderungen an die Stromversorgung ändern, um eine höhere Spannung für die Signalisierung zu verwenden (z. B. 12 V oder 24 V). Dieselbe 2-V-EMI-Störungsspitze, die ein 3,3-V-Endschaltersignal stören könnte, wird bei einem Endschalter, der mit einem 24-V-Signal arbeitet, weit weniger Probleme verursachen.

3.8 Schritt- oder Servomotor-Treiber

Das Metallgehäuse des Treibers sollte mit der lokalen Netzerde des CNC-Systems verbunden werden. Bei einigen Treibergehäusen ist eine bestimmte Klemme als Erdungspunkt angegeben; in diesem Fall muss dieser Punkt über ein spezielles Kabel mit der Erde verbunden werden.

Steuer- und Leistungskabel sollten so weit wie möglich voneinander getrennt werden. Verlegen Sie die Signaleingangsleitungen weit entfernt von den Stromversorgungs- und Motorantriebsausgangsleitungen.

Es wird empfohlen, sowohl die Treibereingangs- als auch die Motorausgangskabel in abgeschirmten Kabeln zu verlegen, wobei die Abschirmung mit der Netzerde verbunden sein sollte. Die Abschirmung der Eingangsleitungen trägt dazu bei, die Menge an Störungen zu reduzieren, die sie empfangen können, während die Abschirmung der Ausgangsleitungen die Menge an Störungen reduziert, die sie abstrahlen können.

3.9 Frequenzumrichter

Wenn möglich, sollte der Frequenzumrichter (VFD) in einem separaten Gehäuse oder Schrank montiert werden, um das Risiko zu verringern, dass er Geräusche in die angrenzende Verkabelung abstrahlt. Wenn das Gehäuse des Frequenzumrichters aus Metall ist, muss es gemäß den Empfehlungen in der Dokumentation des Herstellers geerdet werden.

Da es sich beim VFD um ein elektronisches Schaltgerät mit hoher Leistung und hoher Frequenz handelt, ist der Ausgang bekanntermaßen anfällig für EMI-Strahlung, und es ist ratsam, den VFD-Ausgang mit einem abgeschirmten Kabel zum angeschlossenen Motor zu führen, wobei die Abschirmung mit der Netzerde verbunden sein muss.

3.10 Verlegung von Leitern

3.10.1 Verlegung beweglicher Drähte

Alle Kabel, die während des normalen Betriebs der CNC bewegt werden, fallen in diese Kategorie. Zum Beispiel Kabel, die von den Schrittmotorantrieben durch ein Kabelmanagementsystem (Schlepp-

ketten) und dann zu den Schrittmotoren an einem beweglichen Portal verlaufen. Kabel und Drähte, die unter diesen Umständen eingesetzt werden, sollten für zusätzliche Flexibilität ausgelegt sein. Dies schließt die Verwendung von Vollkernkabeln und -leitungen aus, da die ständige Biegung zu einer Ermüdung und schließlich zum Ausfall der Leiter führt.

Wenn Sie die Kabel in einer Kabelbahn/einem Kabelträger verlegen, binden Sie sie an beiden Enden der Kabelbahn fest. Andernfalls kann ein Ratschen auftreten und das Kabel vorzeitig ermüden. Es sollte auch darauf geachtet werden, dass ein mechanisches Reiben von Leitern an anderen Teilen der Maschine vermieden wird.

Beachten Sie bei einer Kabeltrasse/einem Kabelträger die Idee der neutralen Achse. Verlegen Sie den Draht so nah wie möglich an der neutralen Achse. Achten Sie darauf, dass der Draht in der längsten Lage der neutralen Achse nicht unter Spannung steht.

3.10.2 Verlegung stationärer Drähte

Wie bereits erwähnt, führt die Nähe verschiedener Signalklassen (Hoch- und Niederspannung) zu einer Verschärfung der EMI-Interferenz. Trennen Sie die Leiter so weit wie möglich voneinander. Wenn sich zwei Leiter kreuzen müssen, sollte der Kreuzungspunkt so nah wie möglich an einem 90-Grad-Winkel liegen.

Vermeiden Sie lange Kabelschleifen an allen Peripheriegeräten - sie sind gute Antennen für den Empfang oder die Übertragung von Störungen. Verlegen Sie die Kabel nach Möglichkeit in der Nähe von großen geerdeten Strukturen. Wenn das Gehäuse des Steuergeräts über eine große geerdete Metallrückwand verfügt, sollten Sie die gesamte Steuerverdrahtung so weit wie möglich an dieser Fläche befestigen, während Sie die Kabel zwischen zwei Punkten verlegen.

3.11 Mechanisches Rauschen

Nur sehr wenige mechanische Schalter (z. B. ein Achsendschalter oder ein Werkzeugtastereingang) schließen oder öffnen sich bei Betätigung perfekt. In den meisten Fällen prallen die Schaltkontakte bei der Betätigung innerhalb einer sehr kurzen Zeitspanne mehrmals gegeneinander. Dies kann von der Maschinensteuerung als mehrfache Betätigung desselben Signals interpretiert werden, obwohl in Wirklichkeit nur eine einzige saubere Zustandsänderung erwartet wurde. Manchmal spielt das keine Rolle, aber unter vielen Umständen ist es wünschenswert, sicherzustellen, dass jede Zustandsänderung so ”sauber” wie möglich ist und den Betrieb der Maschine nicht stört. Dies wird durch Entprellung erreicht.

Die Entprellung wird dadurch erreicht, dass eine Zustandsänderung an einem mechanischen Schalter erst nach einer festgelegten Zeitspanne in der Steuerung registriert wird, damit sich ein eventueller Rückprall in den Schaltkontakten ausgleichen kann. Zeitverzögerungen von 5-15 Millisekunden sind normalerweise ausreichend. Dies kann mit dem Zusatz von etwas Hardware, um die Signal-Schaltung oder in der Software innerhalb LinuxCNC getan werden.

3.11.1 Hardware Entprellung (engl. debouncing)

Es gibt mehrere Möglichkeiten, die Entprellung von Schaltern und Relaiskontakten mit Hardware zu implementieren, angefangen von der Hinzufügung eines einzelnen Kondensators über die Signal- und gemeinsamen Leitungen bis hin zu speziellen integrierten Entprellungsschaltungen wie dem MC14490 oder MAX6818. Mehrere Hardware-Entprellungsschemata finden Sie über den unten stehenden Link:

https://electrosome.com/switch-debouncing/

3.11.2 Software-Debouncing

Die Hardware-Abstraktionsschicht (HAL) von LinuxCNC enthält eine Entprellungskomponente. Diese Komponente hat einen einzelnen Eingangspin und einen einzelnen Ausgangspin. Ihre Aufgabe ist es, den Eingang zu überwachen und einen Ausgang zu senden, nachdem der Eingang für eine programmierte Verzögerungszeit aktiviert wurde. Weitere Informationen über die Entprellungskomponente finden Sie auf der folgenden Seite:

link:../man/man9/debounce.9.html

3.12 Dokumentation

Die Bedeutung der Dokumentation der installierten Verdrahtung und Komponenten kann nicht hoch genug eingeschätzt werden. Sollte der Benutzer das CNC-System später ändern wollen oder sollten Probleme auftreten, die behoben werden müssen, kann eine vollständige und präzise Dokumentation der Verdrahtung und Ausrüstung viele Stunden des Kopfkratzens und der Frustration ersparen.

3.12.1 Hardware-Dokumentation

Stellen Sie zumindest sicher, dass Sie die Dokumentation der installierten Hardware an einem sicheren Ort aufbewahren. Schrittmotorsteuerungen, Break-Out-Boards, Stromversorgungen, VFDs, Schnittstellen und Steuerungen, Servo- und Schrittmotortreiber und alle zugehörigen Geräteeinstellungen sind allesamt kritische Komponenten des Systems, deren Dokumentation zum einfachen Nachschlagen bereitgehalten werden sollte.

3.12.2 Schaltpläne

Wenn die CNC-Maschine verdrahtet ist, sollten Sie einen Schaltplan anfertigen, auf den Sie später Bezug nehmen können. Der Schaltplan muss nicht besonders übersichtlich sein, aber er sollte so verständlich sein, dass er später leicht interpretiert werden kann, idealerweise von jedem, der die Maschine warten muss. Fügen Sie Details wie die verwendeten Kabelfarben, Pin-Nummern, Teilenummern und andere Notizen hinzu, die helfen, bestimmte Details zu erklären, die nicht sofort auf den ersten Blick auf den Schaltplan ersichtlich sind.

3.12.3 Identifizierung der Verdrahtung

Nehmen Sie sich die Zeit, jedes Kabel im System zu identifizieren. Wenn ein Bündel von Drähten mit Kabeln verbunden wurde, kann es sehr schwierig sein, sie zu betrachten und mit Sicherheit zu wissen, welcher Draht wohin gehört. Beschriften Sie die Motordrähte mit dem Gelenk oder der Achse, zu dem/der sie gehören, oder kennzeichnen Sie jeden Signaldraht, damit Sie leicht erkennen können, was das Signal bewirkt. Es ist auch hilfreich, wenn diese Informationen auf die Schaltpläne übertragen werden.