

# Schrittmotor-Steuerung mit Antiresonanz-Technik

## Höherer Wirkungsgrad und weniger Vibrationen bei Schrittmotoren

Von René Merz (Magnetron.ch)

Schrittmotoren sind aus der modernen Elektromechanik nicht mehr wegzudenken. Man findet sie überall, vom 3D-Drucker über Festplatten bis hin zu einer Vielzahl an Maschinen. Schrittmotoren haben aber auch nichtideale Seiten, darunter Resonanzphänomene und einen durchaus optimierbaren Wirkungsgrad. Dieser Beitrag zeigt, wie man dem begegnen kann.

Schrittmotoren gibt es von klein bis groß, mit unterschiedlichsten Schrittweiten, Frequenzbereichen und Bauarten – passend zur jeweiligen Anwendung. Gerade Hybrid-Schrittmotoren und Klauenpol-Varianten werden zunehmend bei 3D-Druckern in den Linearantrieben mit Spindeln eingesetzt. Häufig werden sie

dabei jenseits optimaler Bedingungen, also bei hohen Frequenzen und geringen Lasten betrieben, wo störende Phänomene wie mechanische Resonanzen besonders gerne auftreten. Für einen optimierten Schrittmotorbetrieb sollte daher schon in der Ansteuerung diesen Phänomenen Rechnung getragen und ihnen möglichst schon begegnet werden. Im Folgenden geht es daher um die Demonstration einer solchen Ansteuerung auf Basis eines Raspberry Pi plus passendem HAT.

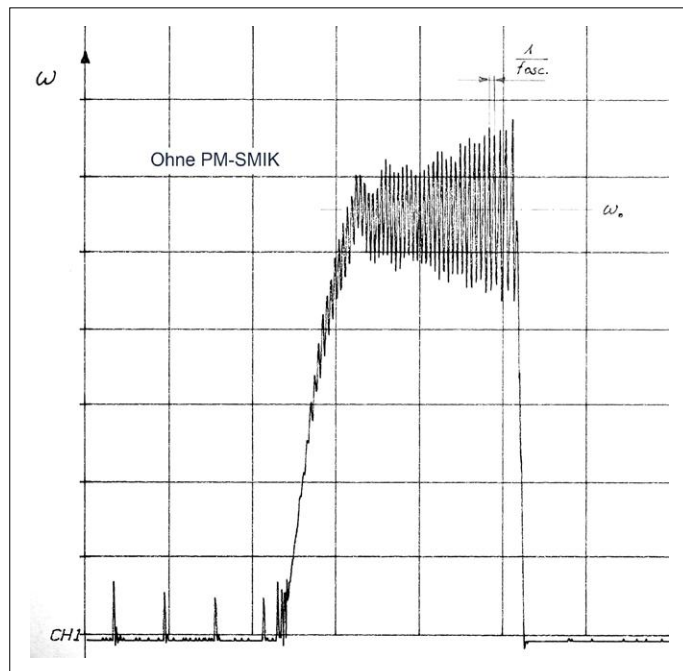


Bild 1. Typische Rotoroszillationen bei kleinen Schrittmotoren über der Frequenz gemessen an einem Shunt. X = 500 ms/Teilstrich und Y = 200 mV/Teilstrich. Ohne Antiresonanz-Maßnahmen ergibt sich eine Oszillationsfrequenz des Rotors von 34 Hz. Nach dem Aufschaukeln blockiert der Motor.

### Resonanzen

Bei Schrittmotoren unterscheidet man zwischen den Eigenresonanzen und einem sogenannten parametrischen Instabilitätsbereich. Eigenresonanzen bei Steuerfrequenzen im Bereich von 1...300 Hz kann man durch mechanische Gegenmaßnahmen (Getriebewahl, Dämpfung etc.) eindämmen. In diesem Bereich erreicht ein Schrittmotor typischerweise einen Wirkungsgrad von < 10 %.

Oberhalb von 300 Hz (bzw. Schritte/s) treten in bestimmten Frequenzbändern die sogenannten parametrischen Resonanzen auf. Hier ergeben sich in bestimmten Frequenzbereichen Oszillationen des Rotors um seine jeweilige Schrittposition (siehe **Bild 1**). Diese Rotorschwingungen können aufgrund von Resonanz große Amplituden erreichen und so dafür sorgen, dass der Rotor nicht mehr synchron zur Steuerfrequenz ist und Schritte verliert und letztlich sogar stillsteht. Ohne geeignete Gegenmaßnahmen kann man daher den maximalen Leistungsbereich nicht voll nutzen (siehe **Bild 2**). Die gestrichelte Linie in **Bild 3** zeigt, dass ohne Gegenmaßnahmen sowohl das Drehmoment als auch die mögliche Steuerfrequenz deutlich unter dem Möglichen bleibt.

### Eine Lösung

Zur Messung der Phänomene bei Resonanz kann man mit den Oszillationen korrespondierende Signale via Shunt (Spannungs-

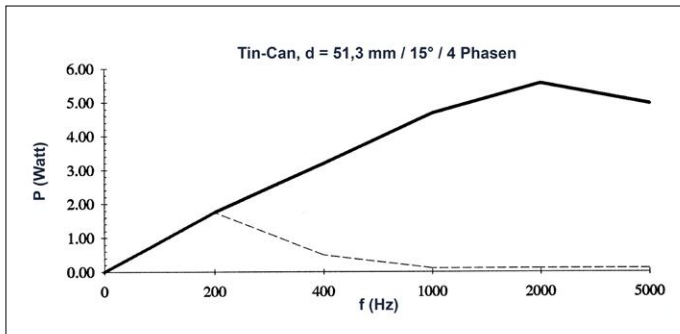


Bild 2. Mechanische Motorleistung in W bei  $I = 0,4 \text{ A/Ph}$  und  $ED = 30 \%$ . Die gestrichelte Kurve ergibt sich ohne Antiresonanz-Schaltung. Damit ergeben sich nicht nur die dreifache mögliche Leistung, sondern auch deutlich höhere mögliche Frequenzen.

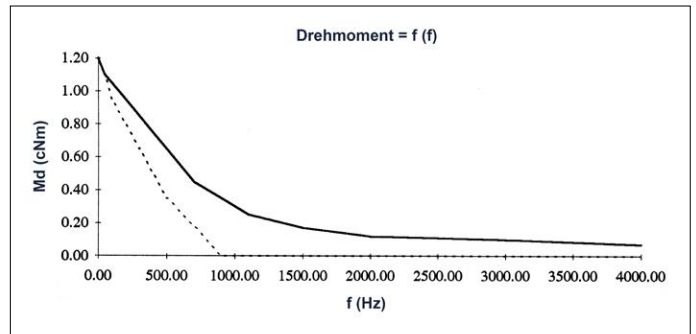


Bild 3. Drehmoment über der Frequenz. Die durchgezogene Linie zeigt die enorme Verbesserung durch die Antiresonanz-Schaltung.

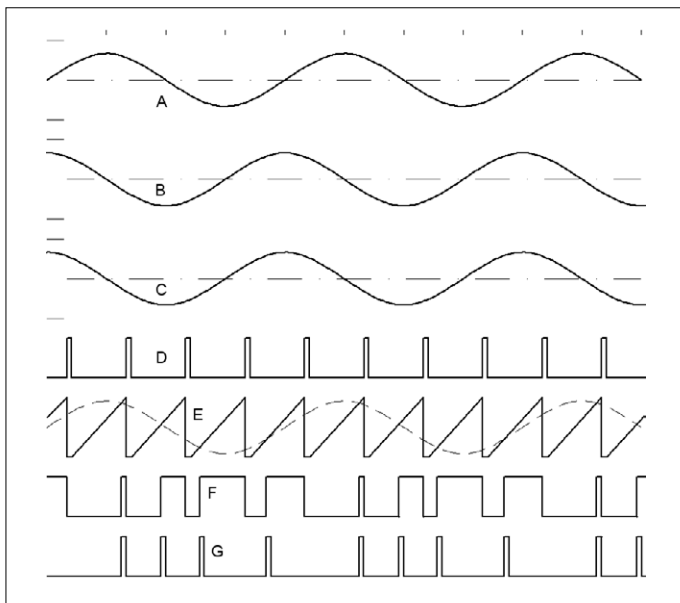


Bild 4. Phasenbeziehungen der Signale der Motorsteuerung. A: Rotorgeschwindigkeit  $\omega$ ; B: Lastwinkel Rotor  $\gamma$ ; C:  $U = f (IT)$ , in Phase mit Signal B; D: Clock-In ( $f_0$ ), vom Frequenzgeber; E: Sägezahnsignal und  $U'$  nach Filter,  $90^\circ$  phasenverschoben; F: PWM; G: Clock-PM, speist den Sequenzer.

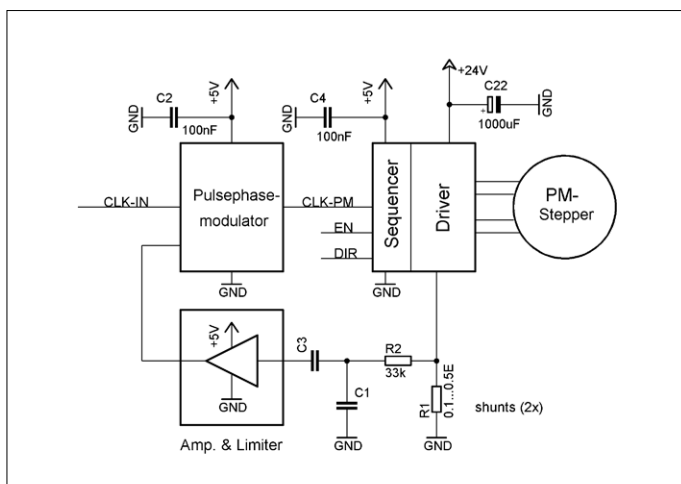


Bild 5. Prinzip der Antiresonanz-Schaltung. Das Signal eines Shunts wird zur Phasenverschiebung der Steuerimpulse genutzt.

abfall des Stroms der Rotorwicklung) abgreifen. **Bild 4** stellt die idealisierten Phasenbeziehungen von Rotor und Steuersignalen dar.

**Bild 5** zeigt das Prinzip einer möglichen Gegenmaßnahme, entwickelt 1986 durch Pierre Boillat [1], dessen Patentschutz mittlerweile abgelaufen ist.

Bei kleineren Klauenpol-Schrittmotoren (Tin-Can-Motoren) weisen die Oszillationen typischerweise Frequenzen im Bereich  $5...80 \text{ Hz}$  auf. Nach Filterung und Verstärkung des Shunt-Signals (unten) steuert dieses einen Pulsphasen-Modulator. Sein Ausgangssignal CLK-PM hat eine korrigierte Phasenlage der Stepper-Impulse und steuert den Sequenzer-Eingang des eigentlichen Motortreibers. So ein Pulsphasen-Modulator kommt dann zum Einsatz, wenn der eigentliche Taktgenerator (meistens ein Mikrocontroller) nicht dazu in der Lage oder konzipiert ist, selbst eine geeignete Phasenmodulation durchzuführen.

Auf diese Weise kann man sehr hohe Schrittggeschwindigkeiten von bis zu  $15.000 \text{ S/s}$  erreichen, was es auch erlaubt, die Schrittmotoren bei höheren Wirkungsgraden zu betreiben. Ein weiterer Vorteil ist, dass man keine speziellen Beschleunigungsrampen einhalten muss, wenn man die Instabilitätsbereiche durchfahren will. Nicht zu verachten ist schließlich, dass ein so stabilisierter Schrittmotor auch weniger Geräusche produziert. Wichtig zu wissen: Dieses Stabilisierungsverfahren hat nichts mit den PWM-Chopper-Stromsteuerungen zu tun, die heute in vielen integrierten Schrittmotor-Treibern eingebaut sind.

### Antiresonanz-Schaltung

Als praktische Demonstration des Prinzips hat der Autor die Schaltung von **Bild 6** entwickelt. Es handelt sich dabei um ein Erweiterungsmodul (HAT) zum direkten Aufstecken auf ein Raspberry-Pi-Board des Formats „A+“. Das steuernde Taktsignal eines externen Mikrocontrollers liegt an CLK-IN bzw. an Pol 3 der Schraubklemmleiste X2. Nach Signalformung mit dem Inverter von IC7 gelangt das Signal an das Monoflop IC3A, welches auf dessen negative Flanken triggert. Am Ausgang Q liegen dann Impulse mit der konstanten Länge von etwa  $30 \mu\text{s}$  an. Diese Impulse entladen über MOSFET T2 den Kondensator C2 des Rechteck/Sägezahn-Wandlers um IC1A und T1...T3. Die gesteuerte Stromquelle mit T1 bewirkt, dass C2 nach Entladung mit T2 durch T1 mit einem linearen Strom auf seinen Maximalwert geladen werden wird. Resultat ist ein recht sauberes Sägezahnsignal am positiven Eingang (Pin 3) des Komparators IC2A. Zusammen mit dem Modulationssignal  $U'$  am negativen

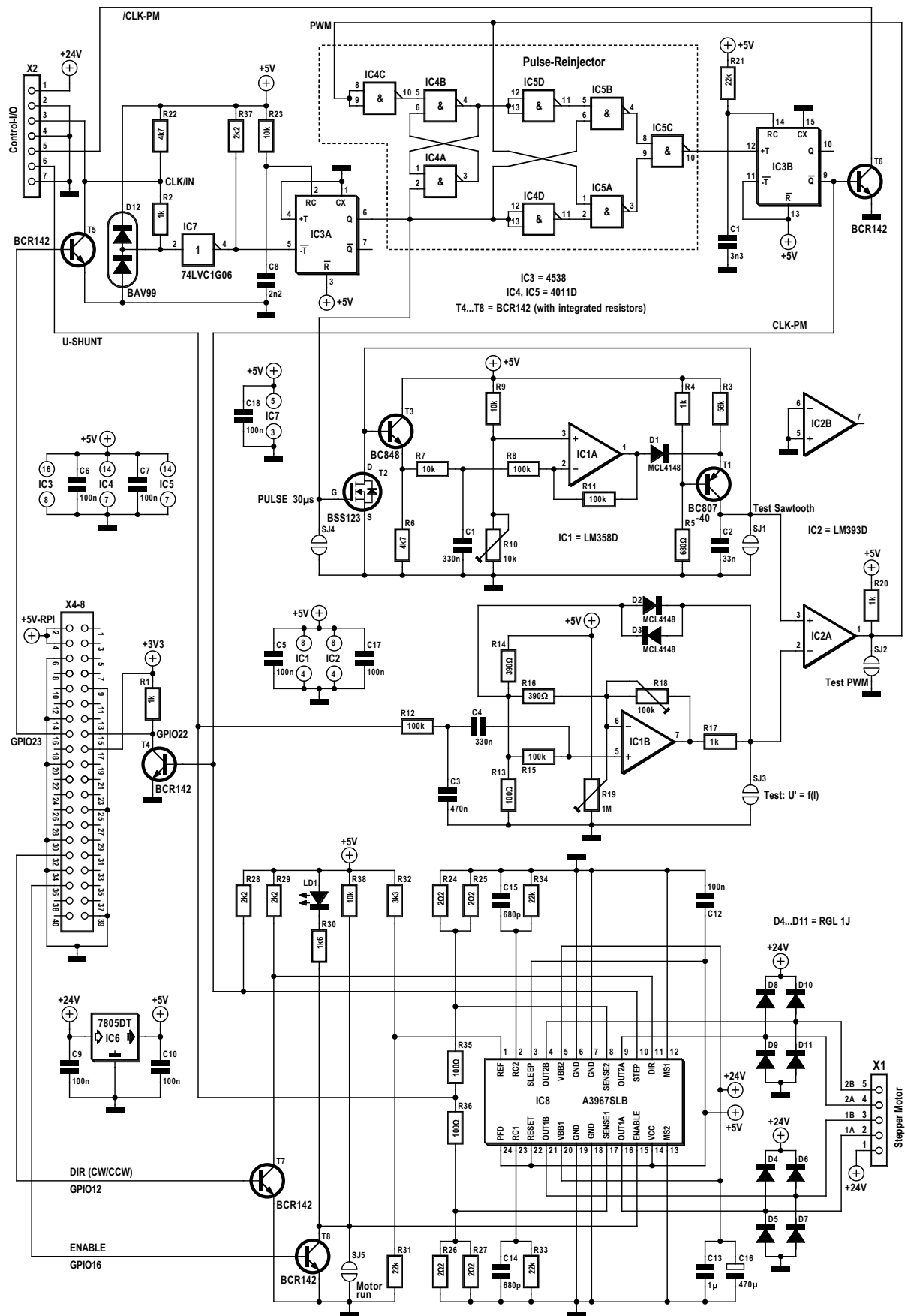


Bild 6. Die konkrete Antiresonanz-Schaltung als RPi-HAT.



Bild 7. Signale der Antiresonanz-Schaltung bei einem Schrittwinkel von 15° und 901,75 Hz. C1: 30-µs-Impulse an SJ4; C2: Sägezahn an SJ1; C3: PWM-Signal an SJ2; C4: Shunt-Signal,  $U = f(I_T)$  an X2-6.

Eingang (Pin 2) ergibt sich am Ausgang (Pin 1) ein Impulssignal mit der gewünschten (linearen) Phasenmodulation. Für einen weiten Frequenzbereich des Modulators sollte der Sägezahn eine von der Frequenz unabhängige Amplitude aufweisen. Hierzu wird die Stromquelle um T1 durch IC1A gesteuert. Zur Konstanzhaltung wird der Mittelwert bzw. die DC-Komponente des Sägezahns nach Pufferung mit T3 und Tiefpassfilterung mit R7 und C1 zur Gegenkopplung genutzt. Das Steuersignal wird dann über D1 in die Stromquelle eingespeist. Bei einem sehr schnellen Sweep (z.B. nur wenige Impulse in einem Anstieg von 0 Hz auf 4 kHz in nur 200 ms) ist diese Regelung wegen der Zeitkonstante von R7/C1 zu träge. Folglich würde die Amplitude des Sägezahns einbrechen, was zu

fehlenden Impulsen am Ende des Sweeps beim Komparator IC2A führen könnte. Das wäre beim Positionieren fatal! Um ein Ausbleiben von Impulsen zu verhindern, wurde die Logik um die NAND-Gatter IC4 und IC5 (Pulse-Reinjector) eingeschleift. Das Monoflop IC3B wird benötigt, da nur die positive Signalflanke moduliert wird, einige handelsübliche Sequenzer-Driver aber auf die negative Flanke triggern. Dank der Open-Collector-Schaltung kann eine nachfolgende Driver-Schaltung mittels Pullup-Widerstand eine Pegelanpassung vornehmen.

Aus dem Signal an den Driver-Shunt-Widerständen R24...R27 wird nach Bandpassfilterung mit R12, C3, C4, R15 und Verstärkung mit IC1B die Modulationsspannung  $U'$  gewonnen. Der Bandpass muss in seltenen Fällen (vom Rotorträgheitsmoment abhängig) angepasst werden. Die Verstärkung kann mit R18 zwischen 1- und 250-fach eingestellt werden. Die Praxis hat gezeigt, dass Verstärkungen um 50 meistens ausreichen. Die Pads SJ1...SJ4 auf der Platine dienen als Testpunkte für ein Oszilloskop. Die im Oszillogramm von **Bild 7** gezeigten Signale können mit den Trimpotis R10, R18 und R19 passend eingestellt werden. R19 dient zur Einstellung des DC-Pegels am Ausgang von IC1B. Er sollte an SJ3 die Hälfte des Spitzenwerts des Sägezahns SJ1 aufweisen und im Bereich 1...1,3 V liegen. Ganz am Schluss folgt mit IC8 der integrierte Schrittmotor-Treiber von Allegro [2]. Das IC A3967SLB enthält einen Sequenzer, eine PWM-Chopper-Stromsteuerung für Microstepping und eine bipolare Transistor-Endstufe mit 0,75 A/Ph. Die Referenzspannung an Pin 1 von IC8 kann mit dem Spannungsteiler R31/R32 an die Stromspezifikationen des jeweiligen Schrittmotors angepasst werden.

### RPi-HAT

Die HAT-Platine von **Bild 8** passt dank einer entsprechend platzierten 2 x 20-poliger Stiftleiste direkt auf ein Board des Typs RPi A+. Dieses kann dann das nötige Steuersignal für den Motor für allerlei praktische Anwendungen generieren. Hierzu werden die Takt-Impulse mit 3,3-V-Pegel über den Port GPIO23 und T5 zur Antiresonanz-Schaltung mit ihren 5-V-Pegeln geleitet. CLK-IN benötigt zur Pegelanpassung einen Pullup-Widerstand (R22). Auch für die Steuerleitungen /Enable (Freigabe Motor, active low) und CW/CCW (Drehrichtung) ist gesorgt. Falls das HAT-Board auf ein RPi-Board gesteckt werden soll, braucht es natürlich noch vier Distanzbolzen und Schrauben für den mechanischen Halt. Die beiden Boards sollten elektrisch getrennt versorgt werden (aus zwei getrennten Netzteilen).

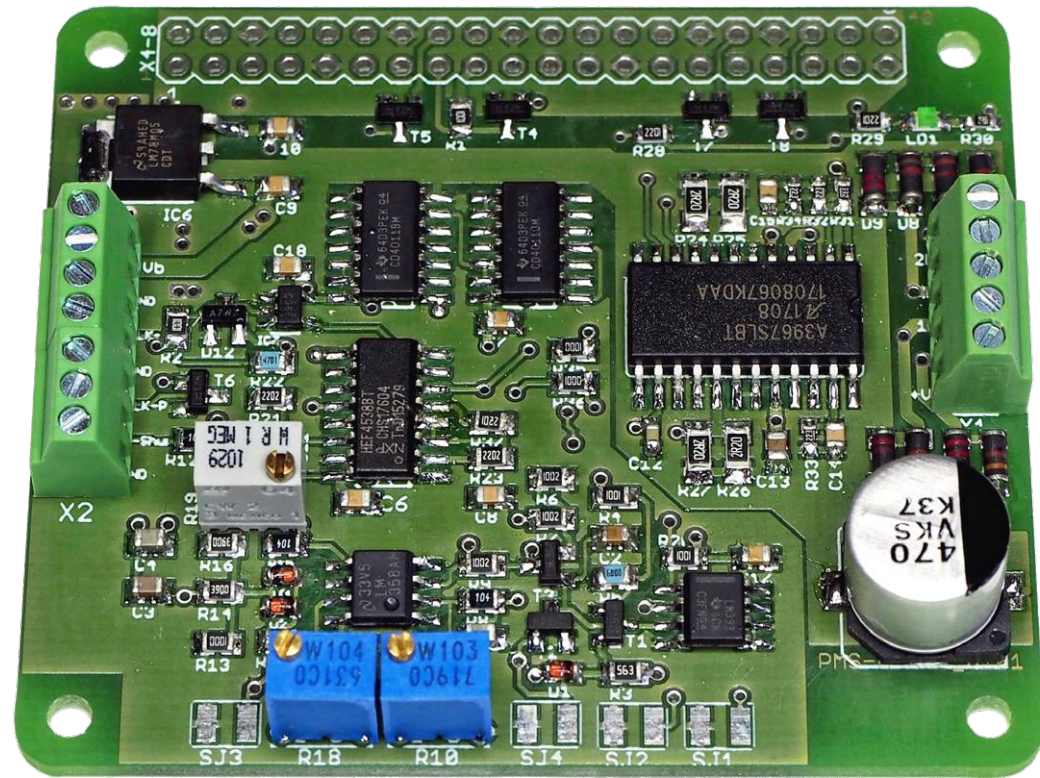


Bild 8. So sieht der Prototyp einer Schrittmotorsteuerung mit Antiresonanz-Schaltung in Form eines RPi-Hat für die Bauform des Modells A+ aus.



Zum Test eignen sich alle kleinen Zweiphasen-Schrittmotoren, egal ob Klauenpol- oder Hybrid-Typen (NEMA17), bipolar oder unipolar mit Wicklungswiderständen im Bereich 5...100  $\Omega$ /Ph und Leistungen von 1...15 W. Bei Widerständen  $\leq 5 \Omega$ /Ph sollte die Stromeinstellung am Driver sehr vorsichtig vorgenommen werden. Im laufenden Betrieb dürfen die Motorleitungen keinesfalls unterbrochen werden.

Obwohl IC8 für bipolare Schrittmotoren ausgelegt ist, können auch unipolare Versionen an die Schraubklemmen X1 angeschlossen werden. Der Mittelanzapfung der Spulen kommt dann an X1-1 (+24 V).

Falls Sie das HAT-Board nachbauen wollen, finden Sie Schaltung und Board-Dateien auf der Elektor-Webseite zu diesem Artikel [3]. Die **Technischen Daten** finden sich in der nebenstehenden Tabelle. Zuletzt bleibt nur noch das Programmieren eines zu Testzwecken oder für Ihre Anwendung geeigneten Impulsgenerators samt entsprechender Anwendung auf dem RPi. Das ist dann Ihre Aufgabe...

### Überlegungen und Hintergründe

Der Autor nahm 2014 einen 3D-Drucker in Betrieb, bei dem sämtliche Antriebsachsen durch bipolare Hybrid-Schrittmotoren (Vierstrang, NEMA17) ausgeführt waren. Die Wicklungen sind hier in Serie geschaltet. Die gewählten Steuerfrequenzen des Controllers lagen leider in Bereichen, in denen das Druckergehäuse ausgeprägte Resonanzen aufwies. Man hätte da die großen Hybrid-Schrittmotoren durch kleinere Versionen ersetzen können, wenn in der Steuerung eine Antiresonanz-Schaltung und ein angepasstes Getriebe eingesetzt worden wäre. Viele Anwender fahren zur Dämpfung im Eigenresonanzbereich im Microstepping-Modus ein – gerade auch wegen der höheren Auflösung. Die höhere Auflösung bedeutet jedoch lange nicht eine entsprechend höhere Positioniergenauigkeit.

Gründe hierfür: Fehler in der Statorgeometrie, Streuung in der Qualität der weichmagnetischen Eigenschaften des Statorblechs und Abweichungen vom Stromsollwert (PWM-Chopper, 1/8-...1/16-Schritt) bei kleinen Phasenströmen!

Bei gleicher Steuerfrequenz am Sequenzer und acht Mikroschritten wird zudem die resultierende Geschwindigkeit der Motorachse um den Faktor 8 reduziert. Man sieht nämlich in der Formel für die mechanische Abgabeleistung ...

$$P_{\text{mech}} = M_d \times \omega$$

... dass die Geschwindigkeit  $\omega$  an der Motorachse und nicht nur das Drehmoment ( $M_d$ ) auch eine wichtige Rolle spielt: Die Last sollte schließlich in möglichst kurzer Zeit exakt positioniert werden können! Bedingung wäre, dass der Mikrocontroller einen oder mehrere geeignete Oszillatoren zur Entlastung integriert hat. Wichtig ist also, dass die MCU genügend Speicher (NV-RAM oder Flash) für die Ablage von Werten für Frequenzen, Burstpulszahlen und Rampen aufweist. Bei den für RPi verwendeten SoCs ist das kein großes Problem.

Damit der Einsatz von Schrittmotoren zukünftig einfacher wird, sollten die Hersteller daher auch den Wirkungsgrad bzw. das Verhältnis von aufgenommener elektrischer Leistung und mechanischer Abgabeleistung als Funktion der Steuerfrequenz in den Datenblättern ihrer Schrittmotoren sauber dokumentieren. Um wirklich alles aus Schrittmotoren herauszuholen, sind komplexe Algorithmen mit Beschleunigungs- und Brems-Rampen zentral. Dies erhöht natürlich den Programmieraufwand. Man sollte es tunlichst vermeiden, den Motor im Bereich von Eigenresonanzen zu betreiben. Das betrifft daher auch den

Technische Daten	
Betriebsspannung	7...24 V
Steuerfrequenz Burst	1 mHz...25 kHz
Zeitverzögerung CLK-In/Out	ca. 5 ms bei 1 kHz
Phasenstrom max.	0,75 A/Ph

Einbau: Man achte auf hohe innere Dämpfung der Motorhalterung. Bezüglich des Einsatzes eines spielfreien Getriebes (Harmonic-Drive) oder einer passend ausgelegten Zahnriementransmission erfordert dies Überlegungen hinsichtlich des Kosten-Nutzen-Verhältnisses. Vielleicht wird es bald preiswerte Treiber-ICs geben, bei denen eine D-Endstufe sogar gleich gefilterte Sinus- und Cosinus-Leistungssignale für die Motorphasen bereitstellt. Begrüßenswert wäre außerdem die zukünftige Verwendung von Statormaterialien mit geringeren Ummagnetisierungs- und Hystereseverlusten, denn heute sind schon Chopper-Frequenzen > 18 kHz üblich. ◀

180279-01

### Über den Autor

René Merz arbeitete von 1985 bis 1990 bei der SAIA AG (heute Johnson Electric International AG, Murten, CH) im Bereich Magnetisierspulen und bei der Entwicklung neuer Magnetrotoren für Schritt- und Synchronmotoren. Seit dieser Zeit bis heute beschäftigt sich René Merz auch mit Steuerungen für Schrittmotoren. Seit Ende 1992 ist er Inhaber der Firma Magneton Labs Merz.

### Weblinks

- [1] Pierre Boillat, „Restraining the instability of a stepper motor“, US-Patente US4673855 und US4683409
- [2] Allegro A3967: <https://bit.ly/2UoRnk1>
- [3] Elektor-Webseite: [www.elektormagazine.de/180279-01](http://www.elektormagazine.de/180279-01)



### IM ELEKTOR-SHOP

→ Buch: „Motorsteuerung mit Arduino und Raspberry Pi“  
[www.elektor.de/motorsteuerung-mit-arduino-und-raspberry-pi](http://www.elektor.de/motorsteuerung-mit-arduino-und-raspberry-pi)

→ Buch (engl.): „Motors for Makers“  
[www.elektor.de/motors-for-makers](http://www.elektor.de/motors-for-makers)

→ Mendocino-Solar-Motor X-8  
[www.elektor.de/mendocino-motor-x-8](http://www.elektor.de/mendocino-motor-x-8)