

# Drehzahlregelung von Lüftern

## Methoden, Dimensionierung, Anwendungen

## Teil 1

*Bruce Denmark* Bei integrierten Schaltkreisen werden immer mehr Transistoren in immer noch kleinere Gehäuse gepackt. Die Folgen sind höhere Geschwindigkeiten, aber auch Wärmestau Probleme. Oftmals ist deshalb der Einsatz von Lüftern erforderlich. Damit ergeben sich allerdings die Lüfter-typischen Probleme wie mechanische Ausfälle, höhere Leistungsaufnahme des Systems und zusätzlicher Lärm. Eine Geschwindigkeitsregelung und -überwachung kann einige dieser Probleme lösen und führt zu zuverlässigeren Lüftern, geringerer Leistung und auch weniger Geräuschemission.

**B**ürstenlose Gleichspannungslüfter sind für die meisten elektronischen Anlagen die erste Wahl. Bevor wir man sich jedoch mit der Lüfterregelung befasst, müssen diese Lüfter verstanden werden. Bürstenlose Gleichspannungslüfter kombinieren hohe Zuverlässigkeit mit einfacher Anwendung. Der einfache bürstenlose Lüfter hat zwei Anschlüsse, an denen eine Gleichspannung angelegt wird. Der einfachste Weg zur Systemkühlung ist also, den Lüfter an eine Gleichspannungsquelle anzuschließen und ihn laufen zu lassen. Ein kurzer Blick auf diverse angebotenen Lüfter ergibt Typen, die an Nominalspannungen von 5 V, 12 V, 24 V oder 48 V arbeiten. Zur Zeit scheinen Lüfter, die an 12 V arbeiten, die gängigsten Typen zu sein. Da aber mehr und mehr Systeme inzwischen ohne eine Spannungsversorgung von 12 V auskommen, werden wohl 5-V-Lüfter an Popularität zunehmen. Lüfter, die an 48 V betrieben werden, werden üblicherweise in Telekommunikations-Systemen eingesetzt.

Bürstenlose Gleichspannungslüfter heißen so, weil die Kommutierung innerhalb des Lüfters elektronisch ausgeführt wird. Ältere Gleichspannungslüfter benutzen mechanische Bürsten, die neben Partikel auch elektromagnetische Störungen in das System einstreuen und sich außerdem im Laufe der Zeit abnutzen. Außerdem sind Bürsten störanfällig. In bürstenlosen Lüftern wurden diese mechanischen Bürsten durch elektronische Sensoren und Schalter ersetzt. Die hat die Lebenszeit und Zuverlässigkeit dieser Lüfter nennenswert verbessert. Der Kommutierungsschaltkreis ist innerhalb des Lüfters montiert und transparent für den Anwender. Das Ergebnis ist ein anwendungsfreundliches und zuverlässiges Bauteil mit zwei Anschlüssen. Für den Endanwender können bürstenlose Gleichspannungslüfter sehr einfach elektrisch charakterisiert werden. Sobald

die an den Lüfter angelegte Gleichspannung verändert wird, verändern sich auch Geschwindigkeit und Stromaufnahme des Lüfters. In erster Näherung sind Geschwindigkeit und Strom direkt proportional zur angelegten Gleichspannung (Bild 1 und 2).

### Möglichkeiten zur Überwachung von Lüftern

Die bürstenlose Kommutierung durchlief einige Entwicklungsstadien, um die Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Lüftern zu verbessern. Dennoch sind Lüfter immer noch mechanische Bauteile, die mechanischem Verschleiß und

damit Ausfällen ausgesetzt sind. Über die Zeit betrachtet kann daher die Lüfterdrehzahl und damit der Kühlwirkungsgrad langsam abnehmen oder gar komplett ausfallen. Daher kann es ausschlaggebend sein, die Lüfter kontinuierlich auf ihren Zustand hin zu überwachen. Die meisten Lüfterhersteller bieten verschiedene Wege, dies zu tun. Die Möglichkeiten können grob in zwei Kategorien eingeteilt werden, nämlich Alarmsensoren und Geschwindigkeitssensoren.

Alarmsensoren erzeugen normalerweise ein digitales Signal, sobald die Lüfterdrehzahl unter eine bestimmte Schwelle gefallen ist oder er gar stehen geblieben ist. Der Hersteller EBM/Papst bietet bei-

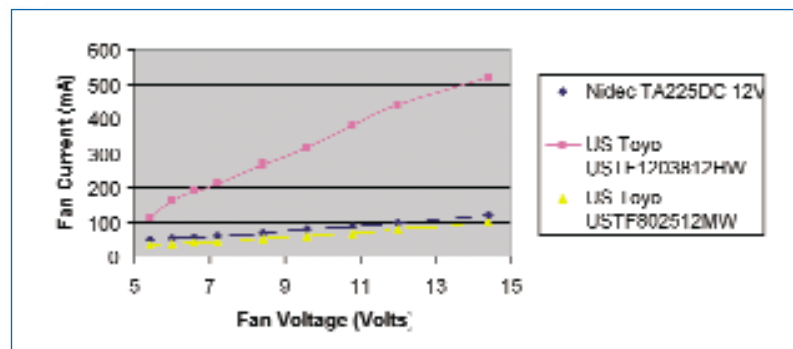


Bild 1: Lüfterstrom in Abhängigkeit der angelegten Spannung

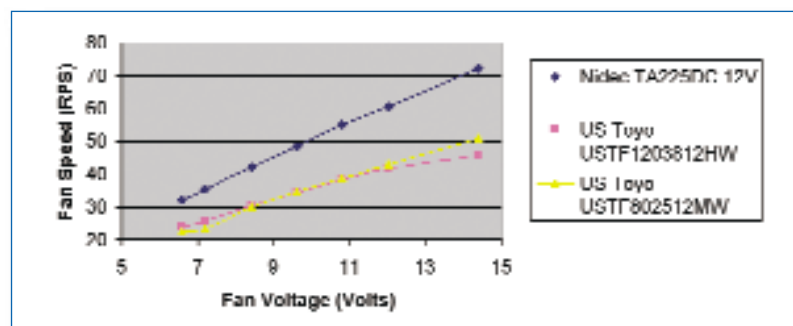


Bild 2: Lüfterdrehzahl in Abhängigkeit der Spannung

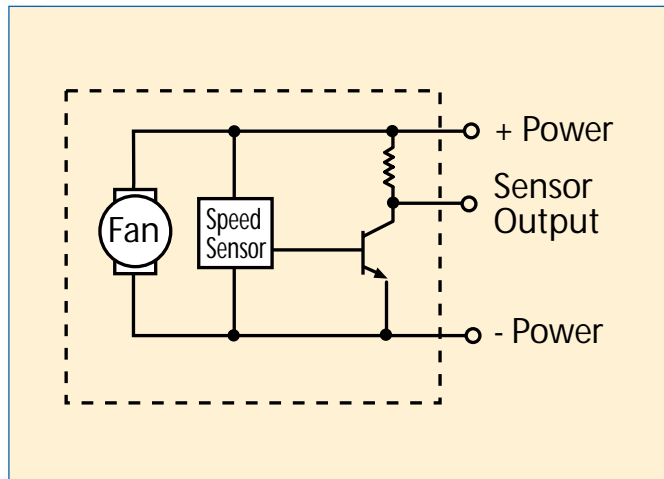
spielsweise ein digitales Ausgangssignal, das mit einer Serie von Low-aktiven Pulsen anzeigt, sobald der Lüfter auf nur noch 75 % bis 85 % der Nenndrehzahl abgefallen ist. NMB Technologies bieten eine etwas andere Möglichkeit, die sie „Locked Rotor Alarm Signal“ nennen. Dieses Signal zeigt mit einem High-aktiven Zustand an, sobald der Lüfter komplett aufhört zu drehen.

EBM/Papst, NMB und weitere Hersteller bieten auch Lüfter mit Geschwindigkeitssensoren an. Diese verfügen über einen digitalen Ausgang, dessen Frequenz proportional zur Lüfterdrehzahl ist. Die gängigsten Geschwindigkeitssensoren erzeugen zwei Pulse pro Umdrehung. Abhängig vom Hersteller und den angebotenen Möglichkeiten können Alarm- und Geschwindigkeitssensoren entweder als Open-Collector-Ausgang oder als Ausgang mit interner Pull-up-Beschaltung geordnet werden. Ausgänge mit interner Pull-up-Beschaltung sind entweder TTL-kompatibel oder sie arbeiten über der gesamten Betriebsspannung des Lüfters.

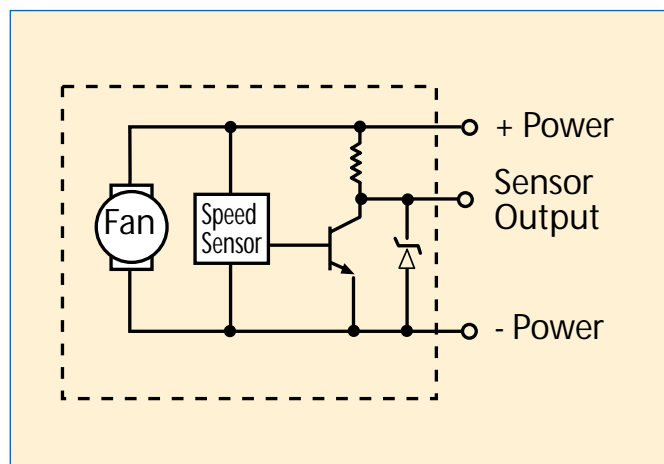
**Bild 3a, b, c** zeigt die Ausgangsstufe, wie sie von EBM/Papst erhältlich ist. Die Alarm- und Geschwindigkeitssensoren teilen sich die Versorgungsspannung mit dem Motor und der Kommutierungselektronik. Jegliche Änderung der Versorgungsspannung zur Regelung der Drehzahl beeinflusst somit auch die Kommutierungselektronik und die Alarm-/Geschwindigkeitssensoren.

### Drehzahlregelung

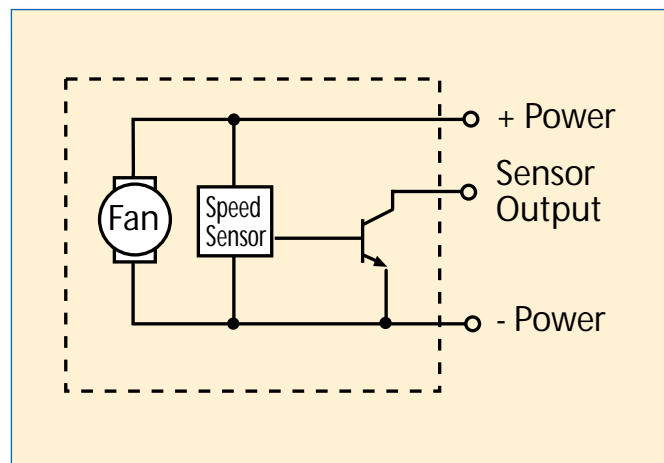
Bei der Auswahl eines Lüfters muss darauf geachtet werden, dass dieser für die Extrembedingungen in der Anwendung ausgelegt ist. Der Lüfter muss genug Luft umwälzen können, um das Sy-



**Bild 3a: Kollektor-Ausgang mit schwachem Pullup-Widerstand**



**Bild 3b: TTL-kompatibler Ausgang**



**Bild 3c: Ausgang als Open-Collector ausgeführt**

stem auch unter extremen Umgebungstemperaturen und höchster Leistungsaufnahme kühl genug halten zu können. Produktionstoleranzen und Alterung des Lüfters sind ebenfalls zu berücksichtigen. Allerdings wird im wahren Leben das System meistens nicht unter Extrembedingungen betrieben. Daher ist es offensichtlich, dass die Lüfterdrehzahl meistens reduziert wer-

den kann, ohne dem System zu schaden, und nur dann hochgefahren werden muss, wenn die Bedingungen es erfordern. „Warum aber“, wird sich mancher jetzt fragen, „sollte ich mir das antun?“ Nachfolgend einige Gründe:

Ein sofort zu bemerkender Vorteil einer Geschwindigkeitsregelung kommt in Form einer Erleichterung für die Ohren. Lüfter, die bei voller Geschwindigkeit laufen, können eine Plage sein, speziell in solchen Gerätschaften, die in einer ruhigen Büroumgebung eingesetzt werden. Die meisten Büroräume befinden sich üblicherweise auf einem Temperaturniveau, das deutlich geringer ist als das, auf dem elektronische Schaltungen maximal betrieben werden können. Dies ermöglicht eine Reduzierung der Lüftergeschwindigkeit ohne Schaden für das System. Gleichzeitig wird für eine Herabsetzung des Geräuschpegels gesorgt. Geräte wie Notebooks profitieren von einer reduzierten Leistungsaufnahme über der Drehzahl für drei verschiedene Lüfter. In erster Näherung geht die Lüfterdrehzahl quadratisch in die Leistungsaufnahme ein. Beim Nidec-Lüfter bedeutet die Reduzierung der Lüfterdrehzahl auf 69 % des Nominalwertes bei 12 V eine Halbierung der Leistungsaufnahme.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass eine niedrigere Drehzahl die Abnutzung des Lüfters verringert. Die Abnutzung ist grob gesagt eine Funktion der absoluten Anzahl von ausgeführten Umdrehungen. Eine reduzierte Abnutzung bedeutet eine erhöhte Lebensdauer und damit eine grössere MTBF für das Gesamtsystem. Weil Lüfter mechanische Bauteile sind, ist deren Ausfall ein altbekannter Grund für Systemausfälle. Alles, was für die Verlängerung der Lüf-

terstandzeit getan werden kann, wird demzufolge eine bedeutende Verbesserung der Standzeit des Gesamtsystems bewirken. Für Systeme wie Server, Telekommunikationseinrichtungen und Netzwerke ist dies besonders wichtig.

Jeder, der schon einmal alte elektronische Geräte geöffnet hat, weiß, dass Staub von der Elektronik regelrecht angezogen wird – in Systemen mit Lüftern ist dieses Phänomen sogar besonders ausgeprägt. Da der Staub sich in lüftergeköhlten Geräten besonders an den Lufteinlässen und –auslässen festsetzt, kann der Luftstrom reduziert oder im Extremfall komplett gestoppt werden. Dies führt natürlich zu reduzierter Kühlwirkung und Temperaturerhöhungen. Eine reduzierte Lüfterdrehzahl kann die „Verstaubungsgeschwindigkeit“ in Systemen verlangsamen und auch dadurch die Systemlebensdauer verlängern.

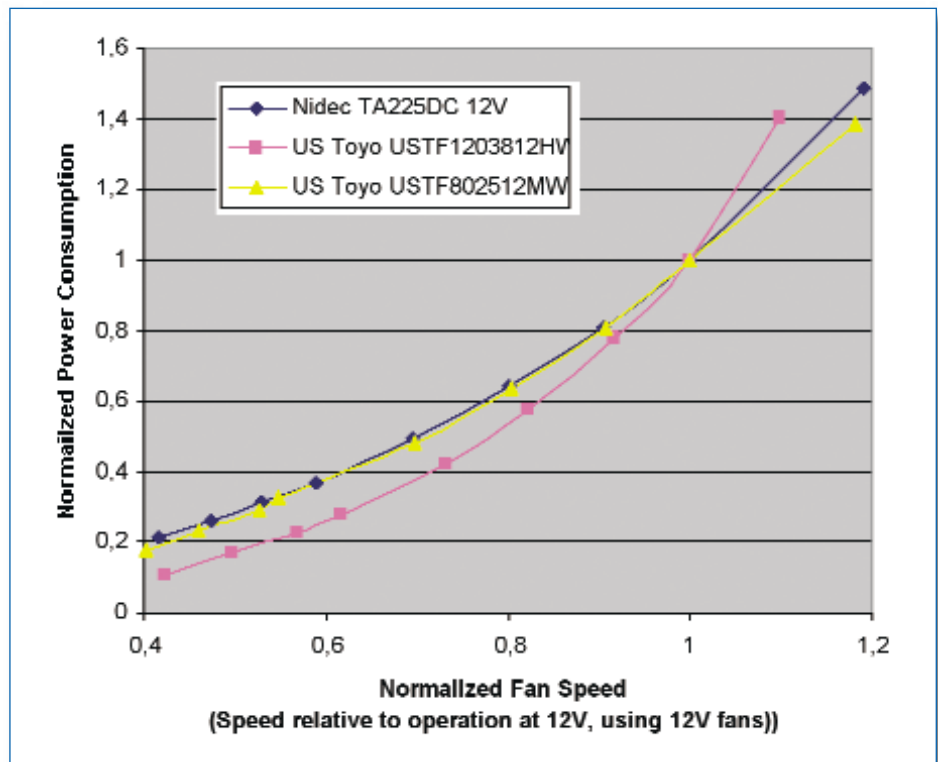


Bild 4: Leistungsverbrauch in Abhängigkeit der Lüftergeschwindigkeit

### PWM-Drehzahlregelung

Nach diesem Ausflug in die Welt der bürstenlosen Gleichspannungslüfter, der verfügbaren Typen und der Erörte-

nisses. Je grösser das Tastverhältnis, desto schneller dreht der Lüfter. Allerdings benötigt es etwas Geschick, die richtige Frequenz für diese Methode auszuwählen. Falls die Frequenz des pulsweitenmodulierten Signals zu niedrig ist,

Schaltkreisen, die aus den beiden Lüfteranschlüssen gespeist werden. Geschieht die Pulsweitenmodulation des Lüfters und somit auch die der internen Kommutierungselektronik zu schnell, kann dies Funktionsaussetzer zur Folge haben. Brauchbare Modulationsfrequenzen liegen im Bereich von 20 Hz bis 160 Hz. Ausserdem müssen die Anstiegs- und Abfallzeiten des PWM-Signals ausreichend langsam sein, um die Langzeitzuverlässigkeit des Lüfters sicherzustellen.

Die Pulsweitenmodulation hat Vor- und Nachteile. Von Vorteil sind eine sehr einfache Treiberschaltung (siehe Bild 7a und 7b), gute Anlauf Eigenschaften und minimale Wärmeverluste im Schalttransistor. Als Nachteile sind eine erhöhte Beanspruchung des Lüfters zu sehen. Ebenso ist der Einsatz von Alarm- und Geschwindigkeitssensoren nicht möglich, da diese Sensoren aus der Versorgung des Lüfters gespeist werden, diese aber mit einer Frequenz von 20 Hz bis 160 Hz ein- und ausgeschaltet wird, werden die Sensoren ständig ein- und ausgeschaltet. Dieser Vorgang macht die Sensoren deshalb nutzlos.

Während der Regelung mittels Pulsweitenmodulation ist die an den Lüfter angelegte Spannung entweder die Nominalspannung (beispielsweise 12 V bei einem 12-V-Lüfter) oder 0 Volt. Weil der Lüfter jedoch unter seiner Nenndrehzahl läuft (was schließlich Sinn des Ganzen sein soll!), ist dessen Rück-EMK reduziert. Während der Einschaltperiode

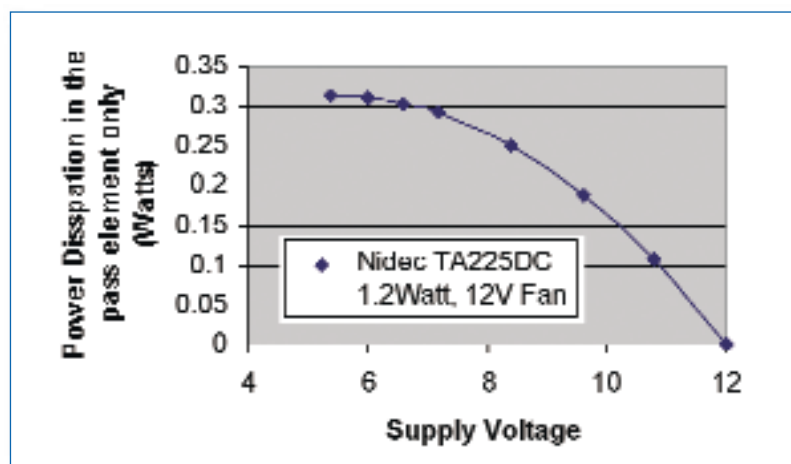
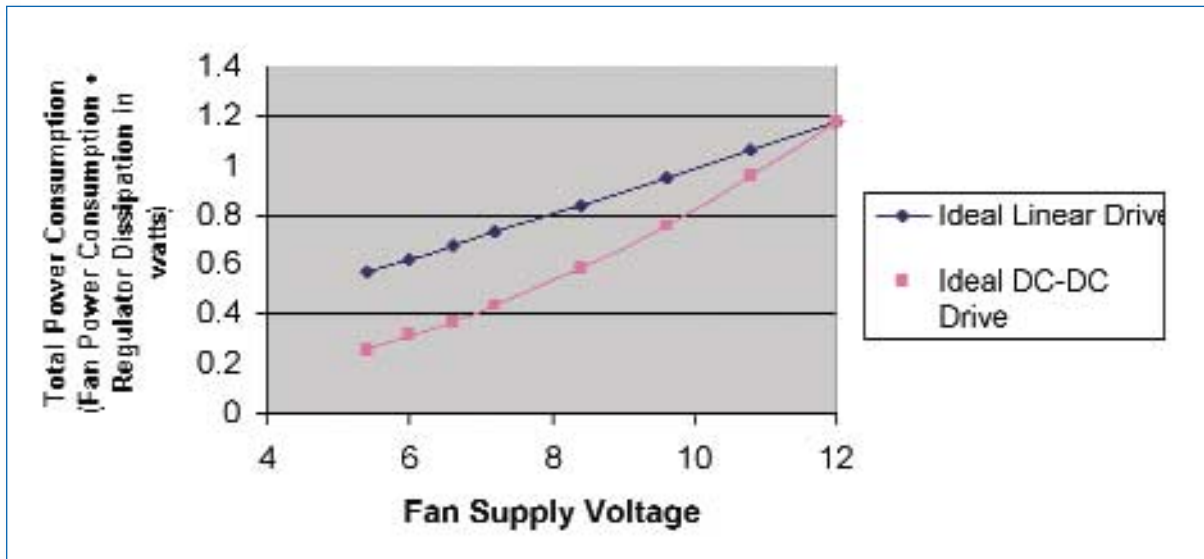


Bild 5: Verlustleistung in Abhängigkeit der Lüfterspannung

rung von Vorteilen einer Drehzahlregelung sollen nun drei Methoden betrachtet werden, wie die Drehzahl von Lüftern geregelt werden kann. Jede Methode bietet ein anderes Preis-/Leistungsverhältnis.

Eine direkte Pulsweitenmodulation (PWM) des Lüfters bedeutet, die Spannungsversorgung des Lüfters mit einer festen Frequenz ein- und auszuschalten. Die Regelung der Drehzahl geschieht über eine Veränderung des Tastverhält-

wird die Lüfterdrehzahl innerhalb eines PWM-Zyklus merklich schwanken. Um dies zu verdeutlichen, stelle man sich ein extremes Ansteuersignal von 0,01 Hz und einem Tastverhältnis von 50 % vor. Der Lüfter wird während der ersten 50 Sekunden zu voller Drehzahl auflaufen und dann innerhalb der nächsten 50 Sekunden anhalten. Andererseits sollte die Frequenz auch nicht zu hoch sein. Wie schon erwähnt, geschieht die Kommutierung auf elektronischem Wege mit

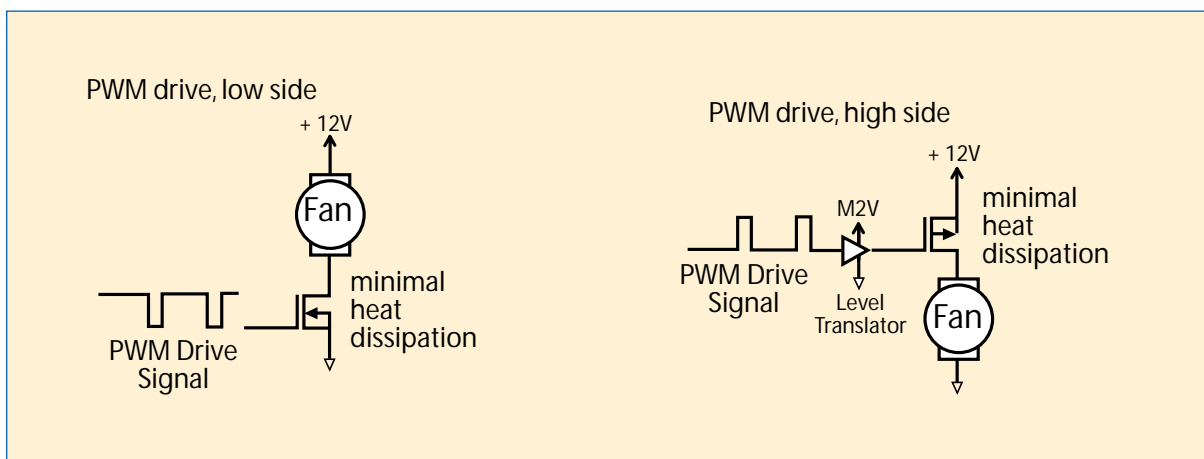


**Bild 6:** Gesamte Verlustleistung

eines PWM-Zyklus fließt dadurch ein höherer Strom als der Nominalstrom durch die Wicklungen des Lüfters. Obwohl Lüfter für erhöhte Ströme ausgelegt sind, wie sie zum Beispiel während des Anlaufs auftreten, können erhöhte Ströme während der gesamten Lebensdauer eines Lüfters, und das beispielsweise 30 mal pro Sekunde, negative Ein-

ter an, die von 50 % bis 125 % ihrer Nominalspannung spezifiziert sind. Ein wesentlicher Vorteil der Linearregelung ist der hier mögliche Einsatz von Alarm- und Geschwindigkeitssensoren. Allerdings hat die Linearregelung auch ihre Nachteile, im wesentlichen sind dies die Verlustleistung im Regelelement, Probleme beim Anlauf sowie ein möglicher

zu abgeschaltet, d. h. es fließt kein Strom – auch hier geht die Verlustleistung gegen Null. Wie bereits erwähnt, besteht zwischen dem Stromfluss durch den Lüfter und der angelegten Spannung in erster Näherung eine lineare Beziehung – das erscheint wie eine resistive Last. Die höchste Verlustleistung im Linearregler entsteht etwa dann, wenn die



**Bild 7:** Tiefziehender Treiber (links) und hochziehender Treiber (rechts)

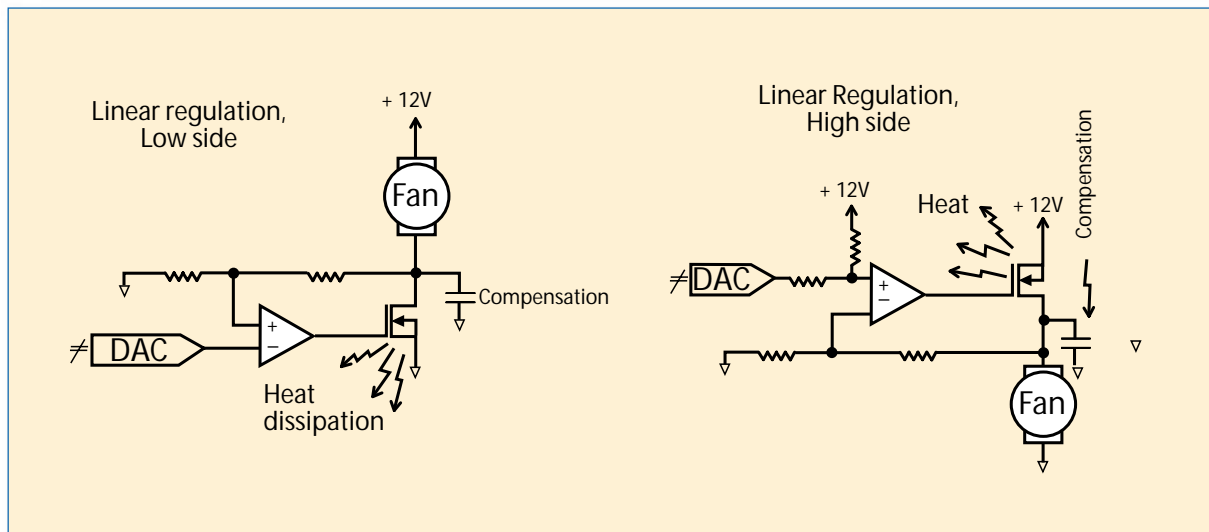
wirkungen auf die Zuverlässigkeit haben. Doch auch mit diesen Nachteilen ist die PWM-Regelung die geeignete Lösung in preiswerten, unkritischen Anwendungen.

## Linearregelung

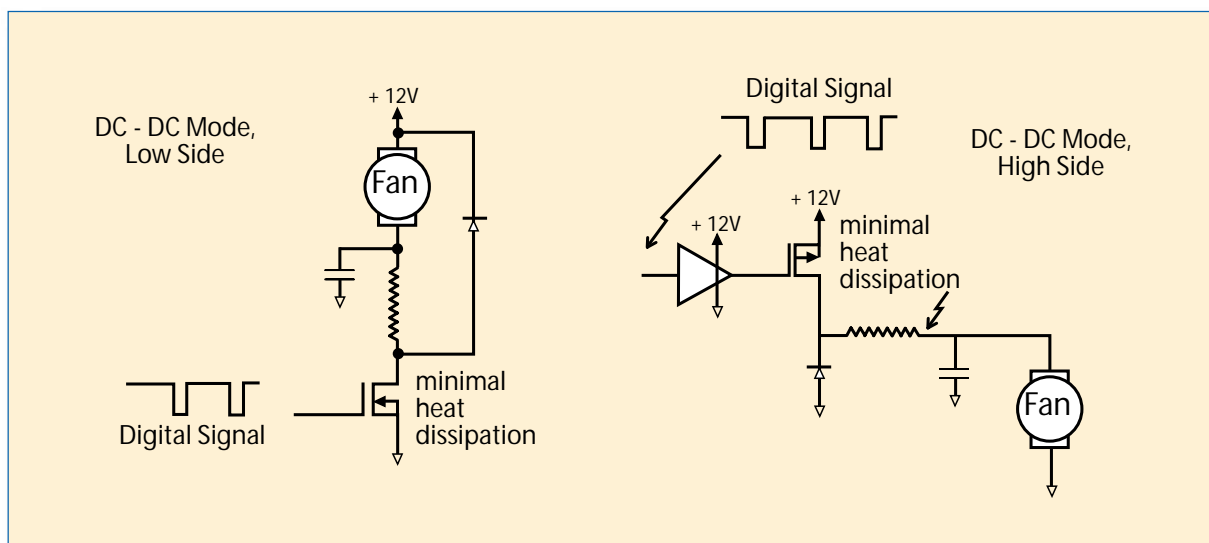
Wie der Name schon andeutet, stellt bei dieser Methode ein Linearregler die Gleichspannung über dem Lüfter ein. Bei dieser Methode ist darauf zu achten, dass der Lüfter für einen weiten Spannungsbereich ausgelegt ist. Der Hersteller EBM/Papst beispielsweise bietet Lüf-

terstillstand. Linearregler arbeiten durch Regelung der Gleichspannung über dem Lüfter. Dadurch entsteht Verlustleistung in Form von Wärme. Es scheint nicht besonders klug, Hitze zu entwickeln, wenn etwas gekühlt werden soll. Allerdings ist diese Methode nicht so schlecht wie man anfangs denken mag. Während maximaler und minimaler Kühlung beträgt die Verlustleistung idealerweise Null. Bei maximaler Kühlung ist der Linearregler voll eingeschaltet, so dass die Spannung über ihm nahezu 0V beträgt und demzufolge auch keine Verlustleistung auftritt. Bei minimaler Kühlung ist der Linearregler nahe-

Spannung über dem Lüfter die Hälfte der maximalen Betriebsspannung beträgt (Bild 5). Die „Worst-Case“-Verlustleistung kann durch folgende Gleichung abgeschätzt werden:  $P = \frac{1}{4} (V_{MAX} \times I_{MAX})$ , wobei  $I_{MAX}$  und  $V_{MAX}$  die Nominalspannung bzw. -strom des Lüfters sind. Bei einem Lüfter mit 1,2W (12V bei 98mA) entsteht eine maximale Verlustleistung von nur 300mW im Linearregler, wenn der Lüfter mit 6V aus einer 12-V-Versorgung betrieben wird. Ein kleiner Trost ist, dass der maximale Wärmeverlust im Lüfterschaltkreis während der minimalen Kühlanforderung entsteht. Auch interessant: Obwohl ein verlustleistungsbehaft-



**Bild 8:** Linearregler mit tiefliegendem Treiber (links); Linearregler mit hochliegendem Treiber (rechts)



**Bild 9:** getakteter Spannungswandler mit tiefliegendem Treiber (links); getakteter Spannungswandler mit hochliegendem Treiber (rechts)

teter Linearregler eingesetzt wird, erreicht man eine Leistungseinsparung, sobald die Lüfterdrehzahl reduziert wird. Probleme können sich beim Anlauf ergeben, ebenso besteht die Gefahr eines Lüfterstillstands. Lüfter benötigen eine bestimmte Versorgungsspannung, bevor sie anlaufen. Diese wird Anlaufspannung genannt. Bei einem bereits drehenden Lüfter wird ein Absenken der Spannung unter die Stillstandsspannung dafür sorgen, dass er stehenbleibt. Die Anlaufspannung ist immer gleich, aber meistens größer als die Stillstandsspannung. Üblicherweise liegen diese beiden Spannungen im Bereich von 25 % bis 50 % der Nominalspannung des Lüfters. Sobald die Linearregelung ohne Drehzahlüberwachung eingesetzt wird, besteht keine Möglichkeit festzustellen, ob der Lüfter stehengeblieben oder angelaufen ist. Es gibt verschiede-

ne Lösungen für dieses Problem. Zunächst kann man dafür sorgen, dass die Spannung über dem Lüfter niemals kleiner als die Anlaufspannung wird. Obwohl dies mittels Software einfach erreicht werden kann, kann dadurch unter zusätzlicher Berücksichtigung von Alterungseffekten im Lüfter niemals der ganze für die Regelung zur Verfügung stehende Spannungsbereich genutzt werden. Man muss beispielsweise eine Minimalspannung von 60 % der Nominalspannung festlegen, um sicherzugehen, dass alle Lüfter anlaufen. Dies ist sicherlich verschwenderisch, da der „durchschnittliche“ Lüfter leicht bis herunter zu 40 % geregelt werden kann. Die zweite Möglichkeit ist der Einsatz eines Lüfters mit Tachometer. Dieser Tachometer kann mit einem Mikrocontroller einfach überwacht werden. Die Software kann dann auswerten, ob ein Lüf-

ter nicht angelaufen ist oder stillsteht. Diese Lösung ist deutlich robuster und erlaubt es, den ganzen zur Verfügung stehenden Spannungsbereich für die Regelung einzusetzen, aber sie benötigt zusätzlich Entwicklungszeit, mehr Bauteile und eine aufwendigere Software.

### Regelung mit getaktetem Spannungswandler

Die Regelung mit Spannungswandler arbeitet ähnlich wie die mit Linearregler. Jedoch wird beim Spannungswandler eine getaktete Spannungsquelle eingesetzt. Weil beide Methoden die Drehzahl über eine Veränderung der Versorgungsspannung regeln, haben auch beide ähnliche Vor- und Nachteile. Der wesentliche Unterschied ist jedoch, dass getaktete Spannungswandler theore-

tisch einen Wirkungsgrad von 100 % erreichen und so gut wie keine Wärme entwickeln. Real erreichte Wirkungsgrade liegen zwischen 75 % und 95 %. Der gute Wirkungsgrad wird allerdings mit höheren Kosten und einem komplexeren Aufbau bezahlt, siehe **Bild 9**. Obwohl Spannungswandler effektiver arbeiten, ergibt sich bei voller Lüfterdrehzahl keine wirkliche Leistungseinsparung, siehe **Bild 6**. Ein wirklicher Gewinn entsteht nur, sobald der Lüfter unterhalb seiner maximalen Drehzahl betrieben wird. Der entscheidende Vorteil ergibt sich, sobald die Spannung über dem Lüfter die Hälfte von dessen Nominalspannung beträgt. Dies ist natürlich deswegen so, weil ein Linearregler an diesem Punkt seine höchste Verlustleistung erreicht. Wegen der erhöhten Kosten und der Komplexität von Spannungswandlern und der begrenzten Leistungseinsparung bleibt diese Methode meist solchen Systemen vorbehalten, die aus einer Batterie betrieben werden oder eine hohe Anzahl von Lüftern einsetzen. Wie bei allen getakteten Spannungswandlern muss auch hier auf eine saubere Leiterbahnführung (Layout) geachtet werden.

### Hoch- oder tiefliegender Treiber?

Alle drei beschriebenen Methoden können mit hoch- oder tiefliegendem Treibertransistor entworfen werden. Hochliegende Treiber (**Bild 8, rechts**) benötigen wegen der Pegelumsetzung eine umfangreichere Beschaltung, bieten aber den Vorteil, dass der negative Lüfteranschluss fest auf Masse liegt. Dadurch werden Alarm- und Geschwindigkeitssensoren massebezogen betrieben – dies erleichtert die Beschaltung. Tiefliegende Treiber (**Bild 8, links**) hingegen benötigen keinen Pegelumsetzer für den Treibertransistor, jedoch müssen die Signale der Alarm- und Geschwindigkeitssensoren angepasst werden. Beim tiefliegenden Treiber wird der positive Anschluss des Lüfters auf konstantem Pegel gehalten (beispielsweise 12 V bei einem 12-V-Lüfter), während der negative Anschluss ein- und ausgeschaltet wird, um eine Drehzahlregelung zu erreichen. Leider teilen sich die Alarm- und Geschwindigkeitssensoren den negativen Anschluss mit dem Lüfter. Daher wird sich deren Ausgangssignal mit der

Drehzahl ändern, was eine Anpassung erfordert.

### Zusammenfassung

Die Regelung von Lüfterdrehzahlen kann eingesetzt werden, um die Systemzuverlässigkeit zu erhöhen, die Verlustleistung zu reduzieren und den Geräuschpegel niedrig zu halten. Es besteht die Wahl zwischen vielen Schaltungen und Möglichkeiten, je nachdem, welches Kosten-/Leistungsverhältnis gewünscht wird. Die vorangegangene Diskussion gibt sicherlich einige Anregungen und mögliche Lösungen für den Einsatz einer solchen Regelung.

Im zweiten Teil dieses Beitrags, der im nächsten Heft erscheint, geht es um Drehzahlregelung mit und ohne Tachometer sowie die Regelung mehrerer Lüfter.



**Bruce Denmark** ist bei Maxim Integrated Products in Sunnyvale, Kalifornien beschäftigt.