

# elektro wärme international

Zeitschrift für elektrothermische Prozesse

## Leistungs-/Thyristorsteller für industrielle Elektrowärmeanlagen

SCR power controllers for electrical industrial heating installations

Olaf Kammerer, Systemtechnik LEBER GmbH & Co. KG

erschienen in **elektrowärme international 2/2007**

Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Stephan Schalm, Telefon 0201/82002-12, E-Mail: [s.schalm@vulkan-verlag.de](mailto:s.schalm@vulkan-verlag.de)

# Leistungs-/Thyristorsteller für industrielle Elektrowärmeanlagen

## SCR power controllers for electrical industrial heating installations

Von **Olaf Kammerer**

Leistungssteller sind aus dem modernen Anlagendesign nicht mehr wegzudenken. Eine intelligente Lösung für Leistungen bis 25 kW ist der Einsatz von Standard-Halbleiterrelais, die über eine Steuerelektronik zu komplett ausgestatteten Leistungsstellern werden. So lässt sich eine sehr kleine Bauform zu einem äußerst attraktiven Preis-/Leistungsverhältnis erreichen. Je nach Anwendungsfall ist eine genaue Prüfung der benötigten Funktionalitäten unerlässlich, um eine technisch und kaufmännisch ideale Lösung zu erzielen. Der Artikel beschreibt neben den grundlegenden Techniken eines Leistungsstellers auch die Besonderheiten bei verschiedenen Anwendungsfällen. Hinweise für die Integration in die Elektroinstallation sowie die Vorstellung eines kostensparenden Ansteuerverfahrens liefern weitere wichtige Informationen für den planenden Ingenieur.

Power controls are used for a large number of applications. A smart solution for loads of up to 25 kW are power controllers based on solid state relays: a standard solid state relay is turned into a fully fledged power controllers by a sophisticated electronic control board. This technology leads to very compact builds with a highly attractive price-performance ratio. In order to achieve a both technically and commercially superior solution a detailed analysis of application specific criteria is necessary. This article gives an insight to basic principles of power controllers as well as application specific guidelines. Further information regarding electrical installation and a cost saving control method support the engineer in the application design.

### Einleitung

Was haben die Erwärmung von Wischtüchern, das Tiefziehen von Kunststoffteilen oder die Extrusion von Plastikbechern gemeinsam? Wie die meisten automatisierten Prozesse müssen sie stets zum richtigen Zeitpunkt mit exakt der richtigen Energiemenge versorgt werden, um konstante Fertigungsqualitäten zu erzielen. Unterschiedliche Anwendungen in unterschiedlichen Umgebungen bedeuten aber verschiedenste Anforderungen an die Leistungssteller.

Eine intelligente Lösung für Leistungen bis 25 kW ist der Einsatz von Standard-Halbleiterrelais, die über eine Steuerelektronik zu komplett ausgestatteten Leistungsstellern werden (**Bild 1**). Diese kann auch im Halbleiterrelais integriert sein, um eine möglichst kompakte Bauform zu erreichen. So lässt sich eine sehr

kleine Bauform zu einem äußerst attraktiven Preis-/Leistungsverhältnis erreichen. Bei höheren Lasten werden die Leistungssteller diskret mit Thyristoren aufgebaut.

Die Leistungssteller – meist per SPS gesteuert – werden zum variablen Stellen von Prozessenergien zwischen 0 und 100 Prozent eingesetzt, wobei verschiedene Lasten wie Strahler oder Lampen mit Energie versorgt werden. Um ein optimales Prozessergebnis zu erhalten, sind bei der Auswahl des geeigneten Leistungsstellers neben der Leistung weitere Kriterien zu beachten:

- Steuerungsarten: Pulsweitenmodulation, Pulspaketsteuerung, Phasenschnitt
- Ansteuerung: Digital, Analog, Seriell, Bus

- Überwachungsfunktionen: Sicherungsfall, Drahtbruch, Lastbruch, Ausfall Lastspannung oder Hilfsspannung, Unterspannung, Ausfall und Teilausfall Halbleiterrelais
- Umgebungsbedingungen: EMV-Maßnahmen, Schwankungen der Versorgungsspannung, Arten und Anzahl der Lasten

Nach der Analyse der beeinflussenden Merkmale lässt sich relativ leicht ermitteln, welcher Steller die Anforderungen am besten erfüllt.

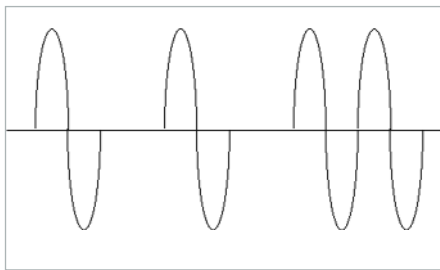
### Thyristorsteller und die verschiedenen Lasten – Einflussfaktoren und Besonderheiten

Als Steuerungsart kommen prinzipiell drei Verfahren zum Einsatz: Die Pulsweiten-Modulation (PWM) bestimmt die Leistung durch das Verhältnis von Ein-



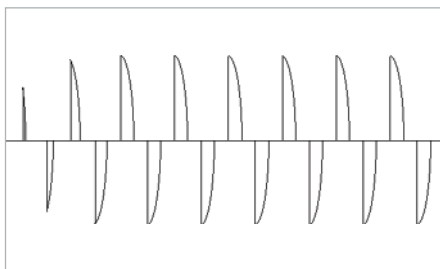
**Bild 1:** Leistungssteller auf Halbleiterrelais-Basis

**Fig. 1:** SCR based on solid state relays



**Bild 2:** Pulspaketsteuerung

**Fig. 2:** Burst firing control



**Bild 3:** Phasenanschnitt

**Fig. 3:** Phase angle control

schaltdauer zu Pausendauer während einer festen Periode und ist die am meisten angewandte Steuerart. Für träge Prozesse ist diese Steuerungsart ideal. Die Pulspaketsteuerung (auch: Impulsgruppenbetrieb) als Unterart der PWM sorgt für gezieltes Schalten einzelner Vollwellen des Netzes mit dem Ziel, lange Ein- oder Aus-Phasen zu vermeiden (**Bild 2**).

Beim Phasenanschnitt wird jede einzelne Halbwellen direkt angeschnitten. Der nicht-sinusförmige Stromverlauf des Phasenanschnitts verursacht im versorgenden Stromnetz teilweise erhebliche Störungen. Da Strom und Spannung nicht denselben Signalverlauf haben, ergibt sich daraus eine so genannte Steuer- oder Oberschwingungs-Blindleistung (**Bild 3**).

Ob im Prozess Phasenanschnitt oder Vollwellensteuerung eingesetzt werden kann, hängt sehr stark von der verwendeten Last und dem gewünschten Ergebnis ab.

## Auswahl der Steuerungsart in Abhängigkeit der Last

### Heizdrähte und Heizstäbe

Heizdrähte und Heizstäbe sind im Prinzip rein ohmsche Widerstandslasten. Sie werden meist, mit Keramikperlen als Isolator, um ein Werkstück gewickelt oder als isolierter Stab direkt in ein Me-

dium getaucht. Sie brauchen in der Regel viel Zeit um das Werkstück oder das Medium zu erwärmen. Zum Ausregeln von Temperaturabweichungen braucht die Last einige bis viele Sekunden oder gar Minuten. Das Werkstück oder das Medium ist thermisch sehr träge. Hier eignet sich besonders die störungsarme Vollwellensteuerung.

### Keramikstrahler

Keramikstrahler sind im Prinzip ebenfalls rein ohmsche Widerstandslasten. Der Heizdraht ist in einem Keramikkörper eingegossen oder eingelegt. Keramikstrahler sind meist sehr viel schneller auf Nenntemperatur und geben dann eine langwellige Infrarotstrahlung ab. Zum Ausregeln von Temperaturabweichungen braucht ein Keramikstrahler meist nur noch einige Sekunden. Das von ihm angestrahlte Werkstück reagiert thermisch oft sehr viel schneller. Trotzdem eignet sich hier meist noch die störungsarme PWM oder Pulspaketsteuerung (**Tabelle 1**).

Bei einer gewünschten Genauigkeit von 5 % umfasst eine Periode 20 Vollwellen und dauert 400 msec. Der Keramikkörper muss demnach so träge sein, dass er die mittlere elektrische Leistung von 400 msec zu einer gleichmäßigen thermischen Strahlung integriert. Falls die Genauigkeit von 5 % auf 1 % gesteigert werden soll, ergibt sich eine Periodendauer von 100 Vollwellen oder 2 Sekunden. Viele keramische Strahler weisen eine hohe thermische Trägheit auf und können derartige Periodendauern noch integrieren. Bei schnellen Strahlern ist jedoch bereits eine deutliche thermische Schwebung zu erkennen. So lange die Prozessgeschwindigkeit des zu bearbeitenden Werksstückes noch so langsam ist, dass das Werkstück – z. B. eine PVC Folie – während einer kompletten Schwebung noch unter den Strahler

liegt, entstehen daraus noch keine Probleme.

### Lampen, Strahler, Infrarotstrahler und NIR-Strahler

Lampen, Strahler, Infrarotstrahler und NIR-Strahler sind keine reinen ohmschen Widerstände mehr. Je kurzweiliger die abgegebene Strahlung ist, desto stärker macht sich bei diesen Lasten der sogenannte Kaltwiderstand des Leuchtfaden bemerkbar. Während Infrarotstrahler dem ohmschen Widerstand noch am nächsten kommen und nur einen kleinen erhöhten Anlaufstrom haben, stellen sich bei NIR-Strahler (Near InfraRed) schon Anlaufströme bis zum 15-fachen des Nennstromes ein.

Des Weiteren reagieren die Glühfäden solcher Lasten sehr schnell auf die vom Leistungssteller angebotene elektrische Leistung. Solche Lasten können nicht mehr mit Vollwellen betrieben werden, da es dann zu starkem Flackern kommen würde. Es empfiehlt sich der Einsatz von Phasenanschnitt mit Sanftanlauf von ca. 200 bis 1000 msec zum schonenden Hochfahren des Strahlers. Insbesondere NIR-Strahler geben ihre Strahlung sehr hoch dosiert ab. Die Prozessgeschwindigkeit des Werkstückes ist in der Regel sehr hoch. Es empfiehlt sich somit, einen geregelten Leistungssteller einzusetzen, der die elektrische abgegebene Energie in Eigenregie sehr schnell misst und so z. B. Netzschwankungen selbstständig und schnell ausregelt.

### Thermisches Schneiden

Beim thermischen Schneiden werden Widerstandsdrähte benutzt um z. B. Styropor in Platten oder ähnliches zu schneiden. Dabei wird der Widerstandsdraht mittels eines hohen Stroms erhitzt ohne dass er dabei zum Glühen gebracht wird. Ein Kamm von z. B. 2x2 m

**Tabelle 1:** Anzahl durchgeschalteter Vollwellen in Abhängigkeit von Genauigkeit und Stellwert

**Table 1:** Number of cycles depending on accuracy and control value

Fall	Stellwert 1%	Stellwert 5%	Stellwert 55%	Stellwert 97%
Genauigkeit 5%, Periodendauer 400msec	Nicht möglich	1 Vollwelle EIN, 19 Vollwellen AUS	11 Vollwelle EIN, 9 Vollwellen AUS	Nicht möglich
Genauigkeit 1%, Periodendauer 2000 msec	1 Vollwellen EIN, 99 Vollwellen AUS	5 Vollwellen EIN, 95 Vollwellen AUS	55 Vollwellen EIN, 45 Vollwellen AUS	97 Vollwellen EIN, 3 Vollwellen AUS

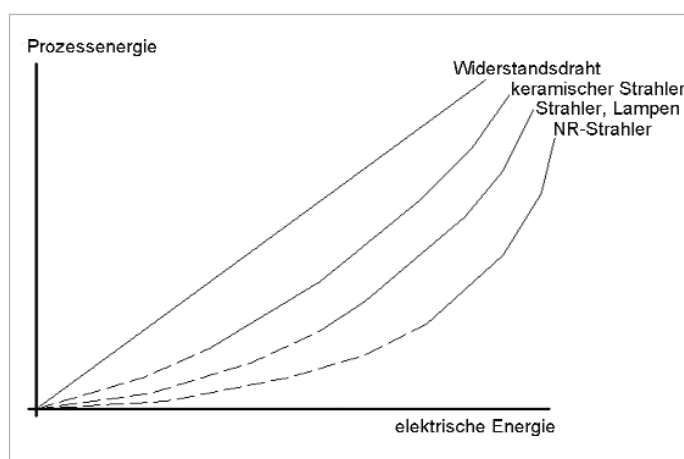
kann von einem bis zu 50 parallel geschalteten Schneiddrähten enthalten. Die Drähte liegen offen und unterliegen damit der Verordnung von Schutzkleinspannung SELV. Die Nennspannung der Drähte liegt zwischen 2 bis 35 V. Die Ströme sind entsprechend hoch und erreichen bei einem voll eingelegten Kamm schon mal einige 100 A. Dies erfordert zwischen dem Leistungssteller und der Last einen Anpasstransformator, je nach Größe der Anlage bis zu einigen -zig kVA. Ein einfacher Leistungssteller ohne Fremdsynchronisation kann einen solchen Trafo nicht mehr ordentlich steuern. Bedingt durch die Induktivität des Transformators kann der Leistungssteller die Nulldurchgänge der Spannung nicht mehr selbstständig erkennen weil Strom und Spannung nicht mehr in Phase liegen. Obwohl die Schneiddrähte ein fast rein ohmsches Verhalten aufweisen empfiehlt sich die Anwendung einer Hochfahrrampe. Transformatoren, die sofort auf z. B. 80 % gestellt werden, reagieren mit einem sehr hohen Inrush-Current. Dieser Inrush-Current hat die Ursache in der Magnetisierung und des Aufbaus der Gegen-EMK bzw. Eigeninduktion. Diese Eigeninduktion fehlt bei der ersten Halbwelle und macht sich als Inrush-Current ab der zweiten Halbwelle bemerkbar. Wird der Transformator mit einer Rampe hochgefahren, kann der Inrush-Current fast vollständig vermieden werden.

### Induktives Heizen

Induktives Heizen, hier sind nicht die hochfrequenten Induktionsheizungen gemeint sondern die 50 Hz Wirbelstromheizungen, wird überall dort eingesetzt, wo die Heizung nicht fest an der Anlage angeordnet ist, sondern sich mit dem Werkstück bewegen muss und wo auch aus anderen technischen Gründen keine Wärme per Strahlern eingesetzt werden kann – wie z. B. die Herstellung von Kunststoffäden wie Angelschnüren etc. Mehrere verschieden temperierte, hintereinander angeordnete schnell drehenden Kalotten nehmen der Faden aus dem Extruder auf und kühlen ihn definiert ab. Die Heizung ist jeweils als Spule im Inneren der Kalotte angeordnet. Weil die Kalotten sehr massiv sind, können diese in Pulspaketsteuerung oder gar als einfache PWM ausgeführt werden. Das Gesamtgebilde verhält sich induktiv wie ein Transformator. Diese Induktivität hat beim Einschalten wiederum einen hohen Inrush-Current

**Bild 4:** Nicht-linearer Zusammenhang elektrischer Energie zu Prozessenergie

**Fig. 4:** Non-linear relationship between electrical energy and process energy



zur Folge was im Endeffekt einem Rotationsschlag (Jitter) der Kalotte verursacht. Jitter führen zu einer Schwankung des Faden Durchmessers (Kaliber). Wenn ein solcher Jitter vermieden werden soll, empfiehlt sich entweder der Einsatz von Phasenanschnitt mit externer Synchronisation oder der Einsatz von PWM mit Sanftanlauf.

### Besonderheiten beim Einsatz von Thyristorstellern

#### Netzschwankungen

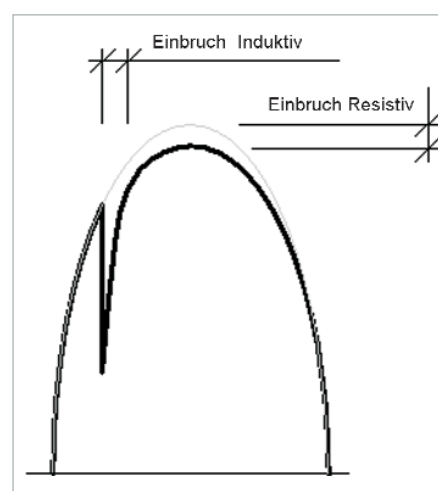
Netzschwankungen innerhalb des versorgenden Netzes führen immer zu Schwankungen der elektrischen Energie, welche der Last zugeführt wird. Wenn sich die Spannung um 5 % ändert, ändert sich im Allgemeinen der Strom ebenfalls um 5 % wodurch sich eine Leistungsänderung von 10 % ergibt. Während bei reinen Widerstandsheizern sich die daraus ergebende Wärme um 10 % ändert, ergeben sich bei komplexen Lasten wie z. B. NIR-Strahlern erheblich größere Veränderungen der Prozessenergie da diese Strahler keinen linearen Zusammenhang zwischen elektrischer Energie und Prozessenergie besitzen. Die NIR-Strahlung wird nur in einem kleinen elektrischen Fenster abgegeben und die Kennlinie hat zum Ende hin eine hohe Steigung. Wenn sich also die elektrische Energie um 10% ändert, bedeutet das für die Prozessenergie eine Veränderung um z. B. 20 % oder mehr (**Bild 4**).

Wenn solche Schwankungen nicht hingenommen werden können, empfiehlt sich der Einsatz eines selbstregelnden Leistungsstellers. Ein solcher Steller versteht das Stellsignal von 0-100 % nicht als Wartezeit zum Zünden der Thyristo-

ren, sondern als Sollwert der Lastspannung z. B. im Bereich von 0-400 Veff. Ein Stellsignal von z. B. 7,00 V ergibt eine Lastspannung von 280 V<sub>eff</sub>, egal, ob die aktuelle Versorgungsspannung gerade 380 VAC oder 450 VAC ist. Besonders vorteilhaft ist es, wenn die tatsächliche effektive Lastspannung besonders schnell gemessen werden kann und nach jeder Halbwelle bereits Korrekturmaßnahmen eingeleitet werden können, sofern Abweichungen festgestellt werden. Eine einfache langsame Effektivwertmessung mit einer Einschwingzeit von z. B. 5 sec für 0,5 % Genauigkeit ist nicht ausreichend bzw. viel zu langsam.

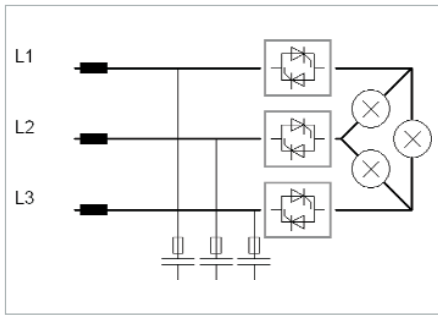
#### Zuleitungsinduktivitäten

In der Praxis führen die meisten Störimpulse zu einer Spannungserhöhung, welche in der Regel von den bordeigenen EMV Komponenten beherrscht wird und somit keinen weiteren Schaden an-



**Bild 5:** Spannungseinbrüche induktiver und resistiver Art

**Fig. 5:** Inductive and resistive voltage drops



**Bild 6:** Kompensation von Leitungsinduktivitäten durch Kondensatoren im 3-phasigen Netz

**Fig. 6:** Compensation of lead inductance with capacitors in 3-phase grid

richtet. Zuleitungsinduktivitäten können Störimpulse verursachen, die zu einem Spannungseinbruch führen. Wenn dieser zu stark ist, kann ein echter nicht mehr von einem falschen Nulldurchgang unterschieden werden. Dies führt in der Regel zum Kippen des Stelllers oder zumindest zum Flackern und muss deshalb vermieden werden (**Bild 5**).

Die Leitungsinduktivitäten können am einfachsten mittels Kondensatoren kompensiert werden. Ein Stützen mittels Kondensatoren führt meist zum gewünschten Resultat. Dabei sind bei der Auswahl und Dimensionierung der Kondensatoren eine Vielzahl von Kriterien zu beachten. Bei Leistungsstellern für höhere Lasten (>100 A) ist meist eine ausgefeilte digitale Netzanalyse integriert, die auch mit schwierigen Netzsituationen zurechtkommt und somit auf eine Zuleitungskompensation verzichtet werden kann (**Bild 6**).

### Entstörmaßnahmen

Wenn Phasenanschnitt verwendet wird, sind meist Entstörmaßnahmen notwendig. Zum einen entstehen Stromoberwellen, die sich hauptsächlich als Blindleistung bemerkbar machen. Blindleistung stört insoweit, dass diese Leistung installiert werden muss – meist in Form von größeren Kabelquerschnitten und bei Überschreiten von  $\cos$ -Grenzwerten richtig teuer bezahlt werden muss. Eine unmittelbare Störung von anderen Netzverbrauchern ist normalerweise nicht gegeben. Zum anderen gibt es die hochfrequenten leitungsgeführten Störungen, die dadurch entstehen, dass der Thyristor zum Zündzeitpunkt die Momentanspannung des Netzes schaltet. Diese führt prinzipiell zu einem sehr steilen Spannungsanstieg. Dieser steile Spannungsanstieg führt in den parasitären Kapazitäten (Kabelkapazitäten, Transformator-Koppelkapazität etc.) zu sehr kurzen aber heftigen Stromspitzen. Diese Stromspitzen addieren sich auf den speisenden Kabeln und in den Kabeln zur Last zu einem hochfrequenten Störspektrum. Dieses Störspektrum kann für andere Netzteilnehmer sehr störend sein.

Eine mindest notwendige Entstörmaßnahme ist die Installation von Y-Kondensatoren an der Einspeisestelle der Anlage im Bereich von 1-5  $\mu\text{F}$ . Dies entstört die Einspeisung meist ausreichend gut und hält das Störspektrum von anderen Netzteilnehmern fern. Der Einbau von Netzfiltern ist nicht ratsam. Netzfilter mit integrierten Induktivitäten und Kondensatoren arbeiten zwar im MHz Bereich recht gut, doch sind sie im unteren Frequenzbereich bis 5kHz eigentlich

unwirksam. Die Praxis hat gezeigt, dass es bei Phasenanschnitt in Verbindung mit solchen Netzfiltern immer wieder zu Resonanzen kommt und sich Schwingkreise aufbauen je nach aktuellem Strom und aktuellem Zündwinkel. Bei solchen Resonanzstellen verlieren die meisten Steller ihre Synchronität bzw. kommen mit den Netzeinbrüchen nach den Filtern nicht zurecht.

Eine weitere wirkungsvollere Methode ist der zusätzliche Einsatz von Sättigungs-drosseln je Lastkreis. Eine solche Sättigungs-drossel verhindert einen abrupten Stromanstieg. Der Stromanstieg wird im Bereich von 50 bis 200  $\mu\text{sec}$  verschliffen.

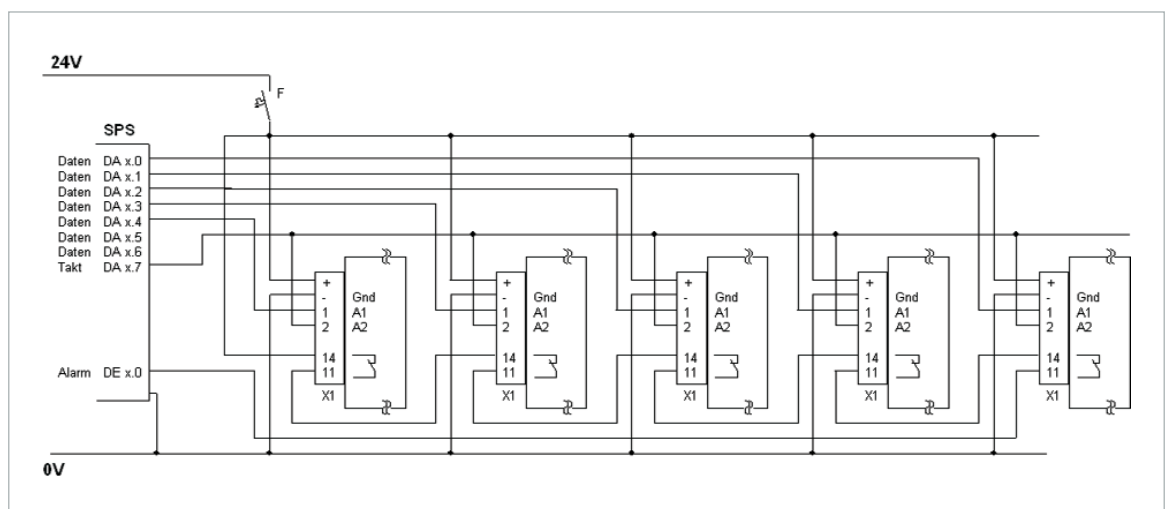
### Alternative Ansteuerung von Leistungsstellern mit einem seriellen Protokoll

Eine gängige Methode zur Ansteuerung von Leistungsstellern bzw. Halbleiterrelais ist die analoge Ansteuerung mit 0-10 V über eine SPS. Dazu wird für jeden einzelnen Leistungssteller ein analoger Ausgang sowie zusätzlich für die gesamte Anlage ein digitaler Freigabe-Ausgang benötigt. Dabei ist im Leistungsbebereich bis ca. 25 kW ein analoger Ausgang genauso teuer wie der Leistungssteller selber.

Eine Alternative ist die Übermittlung der analogen Stellwerte mittels eines seriellen Datentelegramms über digitale Ausgänge. Dazu wird für jeden einzelnen Leistungssteller ein digitaler Ausgang für die Daten sowie zusätzlich für die gesamte Anlage ein digitaler Ausgang für den Takt benötigt. Je Sekunde kön-

**Bild 7:** Prinzipschaltbild für Ansteuerung mit Seriellem Datentelegramm TransDil

**Fig. 7:** Circuit diagram for serial data telegram TransDil



**Tabelle 2:** Kostenersparnis bei einer Anlage mit 50 Einzelstellern (z. B. 50 Heizzonen bei einer Elektrowärme-Applikation)

**Table 2:** Cost savings for an application with 50 SCRs (e.g. 50 heating zones of an electric heating application)

Komponenten	Analoge Ansteuerung mit analoger Rückmeldung	Analoge Ansteuerung	Serielles Datentelegramm
Leistungssteller	50 * €100 = €5.000	50 * €100 = €5.000	50 * €100 = €5.000
Analoge Ausgänge - Stellwert	50 * €100 = €5.000	50 * €100 = €5.000	-
Analoge Eingänge - Istwert	50 * €100 = €5.000	-	-
Digitaler Ausgang - Freigabe	1 * €10 = €50	1 * €10 = €50	-
Digitaler Eingang - Summenfehler	-	1 * €10 = €50	1 * €10 = €50
Digitale Ausgänge - Daten Stellwert	-	-	50 * €10 = €500
Digitaler Ausgang - Takt	-	-	1 * €10 = €50
Gesamtkosten (ohne Verkabelung)	€ 15.050	€ 10.100	€ 5.600

nen 2 Stellwerte übertragen werden; dies ist für eine Vielzahl von Applikationen völlig ausreichend. Die serielle Übertragung der analogen Stellwerte setzt ein Protokoll voraus, das vom Leistungssteller verstanden wird und über eine SPS ausgegeben werden kann. Die meisten Leistungssteller von System-

technik LEBER sind für die Verwendung dieses seriellen Datentelegramms ausgelegt und können dementsprechend kostengünstig angesteuert werden. Für die SPS-Familie S5 und S7 von Siemens steht ein kostenloser Treiber zum Download unter [www.powercontact.de](http://www.powercontact.de) zur Verfügung (**Bild 7**).

Digitale Ausgänge sind wesentlich preisgünstiger als analoge Ausgänge und reduzieren somit die Gesamtkosten der Anlage dramatisch. Ersparnisse von ca. 60 % gegenüber einer analogen Ansteuerung sind möglich (**Tabelle 2**).

## Fazit

Leistungssteller sind aus dem modernen Anlagendesign nicht mehr wegzudenken. Je nach Anwendungsfall ist allerdings eine genaue Prüfung der benötigten Funktionalitäten unerlässlich, um eine technisch und kaufmännisch ideale Lösung zu erzielen. Hohe Einsparpotentiale im Vergleich zu klassischen Lösungen bietet der Einsatz von Leistungsstellern auf Basis von Halbleiterrelais bei Lasten bis ca. 25 kW sowie die Verwendung eines seriellen Protokolls zur Ansteuerung der Leistungssteller.

**Olaf Kammerer**  
Systemtechnik LEBER  
GmbH & Co. KG

Tel.: 0911 / 5406471  
E-mail:  
[okammerer@powercontact.de](mailto:okammerer@powercontact.de)

