

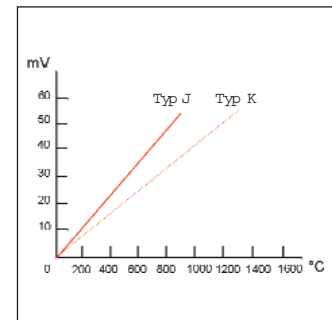
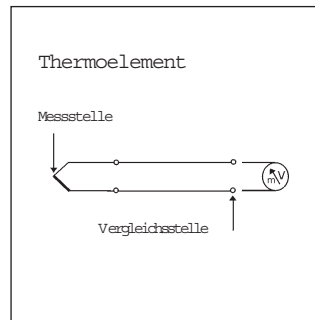


# Temperaturregler

## TEMPERATURMESSUNG

### Seebeck-Effekt und Thermoelemente

Verbindet man die Enden zweier Leiter aus unterschiedlichen Metallen und schafft man ein Temperaturgefälle zwischen den Verbindungsstellen, so ergibt sich ein thermoelektrischer Schaltkreis, in dem ein Gleichstrom fließt. Sobald man eine der Verbindungsstellen trennt, kann man zwischen den Leiterenden eine elektromotorische Kraft messen, die proportional zum Temperaturgefälle der Verbindungsstellen ist. Dieses physikalische Prinzip ist nach Thomas Seebeck benannt, der es im Jahr 1821 entdeckte. Beim Thermoelement wird der Seebeck-Effekt zur Temperaturmessung genutzt, denn es liefert eine Spannung, die proportional zur Temperaturdifferenz zwischen Mess- und Vergleichsstelle ist. Die Thermospannungs-Konstante wird als Seebeck-Koeffizient bezeichnet und ist je nach den verwendeten Metallen - üblicherweise Legierungen - unterschiedlich. Die Angabe erfolgt in  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , der Verlauf der Thermospannungs-Kennlinie ist nicht linear.



### Kompensation der Vergleichsstelle

Das Thermoelement liefert eine zur Temperaturdifferenz zwischen Mess- und Vergleichsstelle (auch als heisse und kalte Verbindungsstelle bezeichnet) proportionale Spannung. Solange jedoch die Temperatur der Vergleichsstelle nicht bekannt ist, lässt sich die exakte Prozesstemperatur nicht damit ermitteln. Um die Prozesstemperatur zu erhalten, wird eine Vergleichsstellenkompensation (Kompensation der kalten Verbindungsstelle) eingeführt und deren Wert automatisch zum Messwert des Thermoelements summiert. Die Temperatur der Vergleichsstelle wird mit Hilfe eines Halbleiters gemessen, der die Verbindungsstelle zwischen Thermoelement und elektronischem Thermometer berührt. Dies ist zum Beispiel mit einer Diode möglich, bei der man die Temperaturdrift der Durchlassspannung ausnutzt.

### Thermoelement-Ausgleichsleitung

Schließt man ein Thermoelement mit einem herkömmlichen Kupferkabel an das elektronische Thermometer an, so erhält man einen Messfehler, der proportional zur Temperaturdifferenz zwischen den Verbindungsstellen des Kupferkabels mit Thermoelement und Thermometer ist. Das Thermoelement liefert nämlich eine Spannung, die der Temperaturdifferenz zwischen Messstelle und Verbindungsstelle mit dem Kupferkabel entspricht, während das elektronische Thermometer nur die an seinem Eingang gemessene Temperatur kompensiert. Zur Korrektur dieses Fehlers verwendet man Ausgleichsleitungen aus Metallen, die ein thermoelektrisch gleichartiges Verhalten wie das jeweilige Thermolement aufweisen. So verlängert man den thermoelektrischen Schaltkreis im Prinzip bis zum Anschlusspunkt des Thermometers. Die Ausgleichsleitungen sind gepolt und je nach Thermolement unterschiedlich.

### Thermoelement-Typen

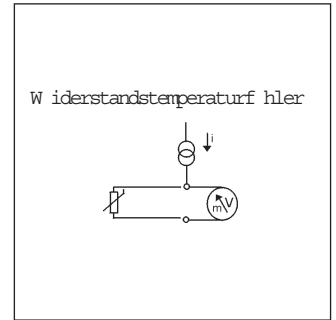
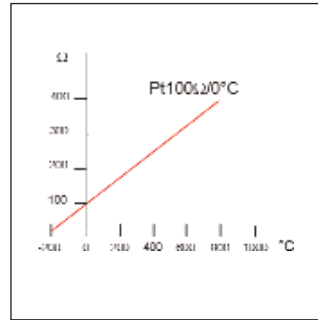
Die einzelnen Thermoelement-Typen sind entsprechend den Legierungen an der Verbindungsstelle mittels Kennbuchstaben nach ANSI-Standard definiert. Typ E, Chromel+/Konstantan- (Ni-Cr/Cu-Ni), ist für tiefe bis mittlere Temperaturen geeignet und hat den höchsten Seebeck-Koeffizienten ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ). Typ J, Eisen+/Konstantan- (Fe/Cu-Ni), ist für mittlere bis hohe Temperaturen am meisten gebräuchlich. Typ K, Chromel+/Alumel- (Ni-Cr/Ni-Al), ist ebenso stark verbreitet und eignet sich in einem breiten Temperaturbereich gleichermaßen für tiefe und hohe Temperaturen. Typ L hat dieselben Eigenschaften wie Typ J, jedoch eine andere Einstellung und einen größeren Seebeck-Koeffizienten. Die Typen R und S unterscheiden sich kaum. Sie sind beide aus Platin Rhodium+/Platin- (Pt-Rh/Pt) aufgebaut und eignen sich nur für hohe Temperaturen, da ihre Kennlinien bei mittleren bis niedrigen Temperaturen ausgesprochen nicht-linear verlaufen. Typ T, Kupfer+/Konstantan- (Cu/Cu-Ni), ist wenig verbreitet und wird vorrangig für tiefe Temperaturen eingesetzt. Die einzelnen Thermoelement-Typen sind passend zu den jeweiligen Installationsanforderungen in unterschiedlichen Größen und Ausführungen erhältlich.

### Ausführung der Thermoelemente

Das Thermoelement sitzt normalerweise in einem zylindrischen Edelstahlgehäuse, seine wichtigsten Spezifikationen sind Länge und Durchmesser des wirksamen Fühlerlements. Ausserdem sind drei weitere Kombinationen von Thermoelement und Gehäuse möglich: Die häufigste Ausführung ist die 'Verbindungsstelle an Masse', bei der das Thermoelement vollständig vom Gehäuse umschlossen ist und mit diesem elektrisch und thermisch Kontakt hat, um die Ansprechzeit nicht zu verlängern. Eine Variante ist die 'isolierte Verbindungsstelle', bei der das Element ebenfalls vollständig umschlossen ist, jedoch eine elektrische Isolierung zwischen Thermoelement und Gehäuse besteht, um Störeinflüsse durch Wirbelströme zu verhindern. Schliesslich ist vor allem für den Laboreinsatz eine Ausführung mit 'freiliegender Verbindungsstelle' möglich, bei der das Thermoelement vollständig aus dem Schutzgehäuse heraussteht. Bei allen Bauformen wird das Gehäuse normalerweise geerdet.

### Widerstandstemperturfühler

Der Widerstandstemperturfühler basiert auf der Eigenschaft von Metallen, ihren elektrischen Widerstand proportional zu ihrer Temperatur zu erhöhen. Platin hat von allen Metallen die günstigste Widerstands-Temperatur-Kennline; es wird als Drahtwendel auf einem Keramik- oder Glasträger verwendet. Die Widerstandssonde sitzt meistens wie das Thermoelement in einem Metallgehäuse, wird jedoch immer elektrisch isoliert. Typ Pt100w /0°C ist eine Platinwiderstandssonde mit einem spezifischen Widerstand von 100w bei 0°C und einem  $\pm$ Koeffizienten von 0,00385w gemäss DIN 43760, so dass sich für 100 °C ein Wert von 138,5w ergibt. Die Widerstandsänderung erfolgt nicht linear und nimmt mit steigender Temperatur leicht ab. Dennoch sind Widerstandstemperturfühler stets genauer als Thermoelemente und werden für mittlere bis tiefe Temperaturen, auch unter 0 C°, eingesetzt.



### Widerstandstermometer mit zwei oder drei Leitern

Zum Anschluss eines Widerstandstemperturfühlers an ein elektronisches Thermometer muss der elektrische Widerstand in eine Spannung umgewandelt werden. Hierzu wird der Fühler von einer konstanten Stromstärke durchflossen. Falls sich der Widerstandstemperturfühler jedoch in größerer Entfernung vom Thermometer befindet, summiert sich der Widerstand der beiden Anschlusskabel zum Widerstand des Fühlers und beeinflusst den Messwert. Beispielsweise steigt der Messwert eines Widerstandstemperturfühlers um ca. 1 °C je 10 m Kabel mit 1mm<sup>2</sup> Querschnitt und wird auch durch die Umgebungstemperatur beeinflusst. Zur Korrektur dieses vom Leiterwiderstand verursachten Messfehlers schließt man einen dritten Leiter, den Kompensationsleiter, zwischen einen Sensoranschluss und einen speziellen Eingang des Thermometers. Man lässt einen dem Stromfluss im Sensor gleich grossen Strom durch den Kompensationsleiter und durch eine Leiterader des Sensors zurück fließen. Hierdurch wird die dem Leiterwiderstand entsprechende Spannung subtrahiert.

### Eigenschaften von Thermoelement (TC) und Widerstandstemperturfühler (TR)

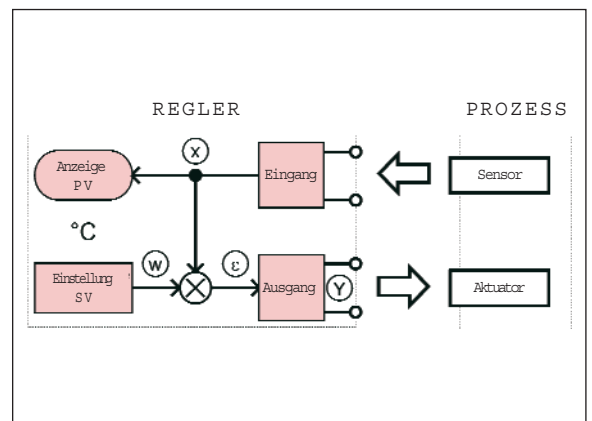
Vorzüge des Thermoelements: Das TC liefert eine Spannung, während am TR ein konstanter Strom fließen muss; das TC ist robust und einfach gebaut, der TR ist empfindlicher und erfordert zur Herstellung aufwendige Technologien und Werkstoffe; ein TC kostet bei gleicher Baugröße und Bauform ca. viermal weniger als ein TR; das TC kann eine mehr als doppelt so hohe Temperatur als der TR messen.

Vorzüge des Widerstandstemperturfühlers: Der TR liefert einen stabilen und absoluten Wert, während beim TC die Kompensation der Vergleichsstelle erforderlich ist; der TR kann eine Verstärkung von einigen mV/°C liefern, während die Verstärkung beim TC nur in der Größenordnung von µV/°C liegt; für den TR ist nur eine relativ einfache Linearisierung erforderlich, während das TC sehr unregelmässige, schwer zu linearisierende Kennlinien aufweist; der TR erreicht eine Genauigkeit von  $\pm 0,1$  °C, während das TC aufgrund der Unreinheit der Legierungen höchstens  $\pm 1$  °C erreicht.

## TEMPERATURREGELUNG

### Maximum und Minimum Regelfunktion

Der gemessene Temperatur-Istwert "Process Value" [x] wird mit dem Sollwert "Set Value" [w] verglichen. Der Temperaturregler errechnet das Ausgangssignal [Y] aus der daraus resultierenden Abweichung [e]. In der einfachsten Konfiguration als EIN/AUS-Regler setzt Ausgang [Y] die Leistung des Aktuators je nach Regeldifferenz [e] auf 0 oder 100%. Bei einer EIN/AUS-Regelung mit Maximum- Funktion wird der Ausgang auf 100% gesetzt, wenn der Messwert [x] geringer als Sollwert [w] und damit die Regeldifferenz [e] negativ ist. Entsprechend wird der Ausgang auf 0% gesetzt, wenn der Messwert höher als der Sollwert ist. Man kann diesen Regler daher zur Überwachung eines Heizvorgangs einsetzen. Im Fall einer EIN/AUS-Regelung mit Minimum-Funktion Direktmodus wird der Ausgang auf 100 % gesetzt, wenn der Messwert [x] über dem Sollwert [w] liegt und die Regeldifferenz [e] also positiv ist. Entsprechend wird er auf 0 % gesetzt, wenn der Messwert unter dem Sollwert liegt. Man kann diesen Regler also für die Überwachung eines Kühlvorgangs einsetzen.



# Grundlagen

## EIN/AUS- und Proportionalregelung

Zur Regulierung der Ansprechempfindlichkeit und um zu verhindern, dass der Ausgang bei jeder kleinen Vorzeichenänderung der Regeldifferenz angesprochen wird, erweitert man die EIN/AUS-Regelung um eine Hysterese. Bei einem Sollwert von 100 °C und einer Hysterese von ±10 °C wird der Ausgang auf Null gesetzt, wenn der Messwert über 110 °C ansteigt bzw. geht auf 100% zurück, wenn der Messwert unter 90 °C abfällt. Die EIN/AUS-Regelung bewirkt also ein periodisches Pendeln der Temperatur. Um eine konstante Temperatur zu erhalten, verwendet man eine proportionale Regelfunktion (P-Regelung), bei der der Ausgang innerhalb eines Proportionalbereichs linear zwischen 0 % und 100 % variiert und einem stabilen Wert bei 50 % mit einer Regeldifferenz von fast Null zustrebt. Betragen beispielsweise der Sollwert 100 °C und der Proportionalbereich 40 °C, so wird der Ausgang bei einer Temperatur unter 80 °C auf 100 % gesetzt und fällt dann bei steigender Temperatur linear bis auf Null ab, bis 120 °C erreicht sind. Um eine lineare Änderung eines Ausgangs mit zwei Schaltzuständen zu erhalten, verwendet man eine Modulierung der Zustände EIN und AUS und ändert deren Verhältnis, während die Zykluszeit (Ton+Toff) konstant gehalten wird.

## Anwendungsbereiche und Einsatzgrenzen von EIN/AUS- und Proportionalregelung

Die EIN/AUS-Regelung folgt der thermischen Trägheit des Prozesses und ist daher durch ein erhebliches anfängliches Überschwingen mit anschließendem starkem und langsamem Pendeln um den Sollwert gekennzeichnet. Sie wird bei preiswerten Reglern angewendet und ist für alle Prozesse geeignet, für die nur eine geringe Ansprechempfindlichkeit und eine grosse Zykluszeit benötigt wird wie beispielsweise bei Heizvorgängen mit Gasbrennern. Die Proportionalregelung hingegen ermöglicht eine erhebliche Reduzierung der Überschwingamplitude sowie der Oszillation, jedoch nur mit kurzen Zykluszeiten. Die P-Regelung verwendet man daher für Prozesse, die mit höherer Ansprechgenauigkeit und Präzision gefahren werden können wie beispielsweise Heizvorgänge mit elektrischen Heizelementen. Mit der Proportionalregelung ergibt sich allerdings u. U. aus der Differenz zwischen der gelieferten Leistung und dem tatsächlichen Leistungsbedarf des Prozesses eine bleibende Regeldifferenz. Ausserdem ist das Übergangsverhalten langsam und oszillierend.

## PID-Regelung

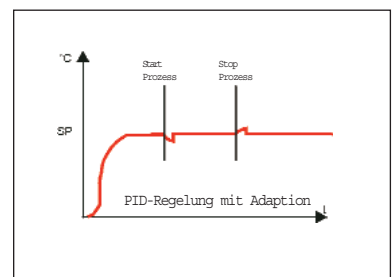
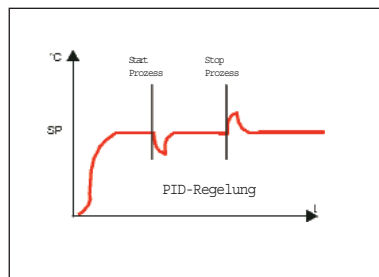
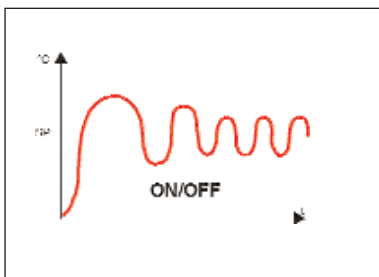
Zur besseren Abstimmung erweitert man die Proportionalregelung um ein Integralglied I und ein Differenzierglied D. Das I-Verhalten erhöht die Wirkung des Proportionalglieds schrittweise, bis die Regeldifferenz annulliert ist. Die Integrierzeit definiert, innerhalb welcher Zeit das I-Regelglied die Wirkung der P-Regelung verdoppelt. Das Differenzierglied korrigiert vorbeugend dynamische Regelabweichungen (Überschwingen, Oszillieren, Sprungantworten) durch Verstärkung der P-Regelung entsprechend der Geschwindigkeit der Temperaturänderung. Die Vorhaltezeit definiert die Einwirkdauer des Differenzierglieds auf die Proportionalregelung. Praktisch bewirken das I- und D-Regelglied eine Verschiebung des Proportionalbandes, das damit asymmetrisch zum Temperatur-Sollwert verlagert wird. Eine korrekte Abstimmung der Parameter (Proportionalband, I- und D-Zeitkonstanten) ist Voraussetzung für eine einwandfreie PID-Regelung.

## Automatische Einstellung der PID-Parameter

Die bei mikroprozessorgesteuerten Temperaturreglern vorhandene Autotuning-Funktion sorgt für eine automatische Abstimmung der PID-Parameter. Das Autotuning führt drei EIN/AUS-Regelzyklen durch, misst dabei die Periodendauer  $T$  sowie die Amplitude  $A$  und berechnet dann die Parameter der PID-Regelung. Der Zusammenhang zwischen Parametern des PID-Reglers und Prozessdynamik ergibt sich nach Ziegler-Nichols als : Proportionalband  $P_b = A \cdot 1,5$ ; Integrierzeit  $T_i = T/2$ ; Vorhaltezeit  $T_d = T/8$ ; Zykluszeit  $T_c = T/20$ . Das Autotuning eignet sich besonders für temperaturstabile Prozesse. Falls hingegen wiederholte Wärmeverluste beispielsweise durch Bearbeitungseingriffe auftreten, müssen die Parameterwerte verringert werden, da der Prozess andernfalls beschleunigt und instabil wird. Das manuelle Nachstellen der PID-Parameter erfolgt anhand einiger einfacher Grundregeln, die auf dem Temperaturverlauf basieren.

## Manuelles Nachstellen der PID-Parameter

Für das manuelle Nachstellen der Parameter der PID-Regelung gilt folgende Faustregel: Wenn ein ausgeprägtes anfängliches Überschwingen und eine nachfolgende Abweichung vom Sollwert mit grosser Periodendauer und Amplitude vorliegt, muss man das Proportionalband reduzieren. Wenn eine bleibende Schwingung mit kurzer Periodendauer vorliegt, muss man das Proportionalband vergrössern. Wenn der Sollwert zu langsam erreicht wird und die Temperatur anschliessend mit grosser Periodendauer um diesen Wert pendelt, muss man Integrierzeit, Vorhaltezeit und Zykluszeit verringern. Wenn ein sehr starkes anfängliches Überschwingen vorliegt, die sich anschliessend auf den Sollwert einschwingt, muss man diese Zeitvorgaben hingegen verlängern. Beim manuellen Nachstellen der PID-Regelparameter empfiehlt es sich, jeweils nur kleine Änderungen vorzunehmen und stets folgende Verhältnisse einzuhalten:  $T_i/T_d = 3 \dots 5$   $T_i/T_c = 10 \dots 20$ .



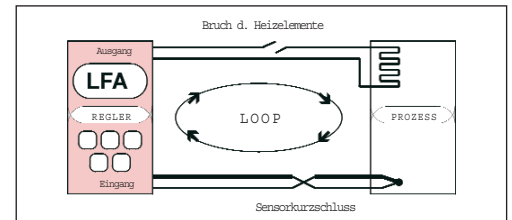
## Adaptivfunktion ADT

Die Adaptivfunktion ADT der mikroprozessorgesteuerten Temperaturregler von **DATASENSOR** optimiert Zeitverhalten und Genauigkeit des PID-Reglers, ohne dass dessen Parameter von Hand nachgestellt werden müssen, denn sie modifiziert den Regelalgorithmus in Funktion des Differentials der Temperaturänderung. Diese Funktion empfiehlt sich für alle Prozesse, bei denen häufige oder heftige Lastschwankungen erhebliche Abweichungen vom Temperatur-Sollwert bewirken. Eine typische Anwendung für die ADT-Funktion sind daher Heißsiegelvorgänge auf automatischen Verpackungsmaschinen, wenn die Maschine zum Nachladen oder Wechsel des Verarbeitungsguts angehalten und neu gestartet werden muss. In diesen Fällen bewirkt die Adaptivfunktion eine deutliche Reduzierung der Totzeiten sowie des durch Temperaturabweichungen der Siegelemente verursachten Ausschusses.

## LFA-Diagnosefunktion (LFA = Loop Fault Alert) Mess- und Regelkreisüberwachung

Als "loop" wird der aus folgenden Elementen aufgebaute Regelkreis bezeichnet: *Prozess* → *Sensor* → *Regler* → *Aktuator* → *Prozess*. Die LFA-Funktion ermittelt eventuelle Störungen außerhalb des Reglers wie beispielsweise einen Kurzschluss oder Kabelbruch an Sensor oder Aktuator. In einem derartigen Fall generiert die LFA-Funktion eine Fehlermeldung auf der Anzeige u./o. deaktiviert den Hauptausgang, wenn sich die Ist-Temperatur bei 100 % Ausgangsleistung nicht innerhalb der Integrierzeit ändert.

Durch ihre Verknüpfung mit der Integrierzeit ist diese Funktion auf die Prozesszeiten abgestimmt und ist ebenfalls für eine EIN/AUS-Regelung anwendbar. Die Deaktivierung des Hauptausgangs ist bei Störungen des Sensors oder der Anschlussleitung in jedem Fall angebracht, denn der Regler könnte den Ausgang andernfalls unnötigerweise einschalten oder sogar beschädigen.



## Relaisausgang und Transistorausgang

Der Hauptausgang des Temperaturreglers steht als Relais- oder Transistor zur Verfügung, was je nach Anwendung diverse Vorzüge bietet. Der Relaisausgang ist üblicherweise ein Umschaltkontakt mit 250 VAC und max. 5 A und kann zur direkten Ansteuerung von Heizelementen bis 1200 W eingesetzt werden. Falls grössere Lasten angesteuert werden müssen, verwendet man den Transistor, der eine Spannung zwischen 10 und 30 VDC mit max. Ausgangsstrom 20 mA liefert und damit zur Ansteuerung von Leistungsschützen und statischen Relais für Stromlasten bis 25 bzw. 50 A geeignet ist. Der Transistorausgang ermöglicht ferner zusammen mit dem Halbleiter-Relais extrem kurze Zykluszeiten bis 1 Sekunde. Beim Relaisausgang bzw. bei einer Ansteuerung externer Leistungsschütze muss die Zykluszeit auf 10 Sekunden begrenzt werden, um die mechanische und elektrische Lebensdauer der Kontakte nicht zu beeinträchtigen.

## Zusatzausgänge für Alarm oder Festpunktregelung

Neben dem Hauptausgang sind an Reglern meistens Zusatzausgänge mit den Funktionen "Alarm" und "Festpunkt" vorhanden; die Schaltlogik kann hierbei als Sollwertbegrenzung nach oben oder unten und mit oder ohne Totzone ausgeführt sein. Bei einem Alarm richtet sich der Temperaturwert der Auslösung nach dem Sollwert, bei der Festpunktregelung ist dieser Wert hingegen absolut und reglerunabhängig. Ein auf -10 °C eingestellter Übertemperaturalarm wird bei Unterschreitung von 90 °C ausgelöst, wenn der Sollwert 100 °C beträgt, und wird bei Unterschreitung von 80 °C ausgelöst, wenn man den Sollwert auf 90 °C setzt. Ein fixer Höchstwert von 100 °C wird stets bei Unterschreitung von 100 °C ausgelöst, unabhängig vom jeweiligen Sollwert. Ein Alarm löst bei ausgeschalteter Totzone, Einstellwerten von -20 °C und +10 °C und einem Temperatur-Sollwert von 100 °C unterhalb von 80 °C und oberhalb von 110 °C aus. Bei der Festpunktregelung mit aktivierter Totzone und Einstellwerten unter 80 °C sowie über 130 °C ist der Regler innerhalb dieses Temperaturbereichs stets aktiviert.

## Alarmunterdrückung der Zusatzausgänge

Die Alarmausgänge haben normalerweise ein Relais für die Ein- bzw. Ausschaltung sonstiger, vom Temperatursollwert des Hauptausgangs abhängiger Prozesse. Eine typische Anwendung ist ein Initiierungssignal zum Maschinenstart, sobald eine bestimmte Temperatur erreicht ist, oder der Abbruch eines Prozesses, wenn dieser einen bestimmten Sicherheits-Schwellenwert überschreitet. Die Alarmunterdrückung verhindert, dass der Zusatzausgang beim ersten Erreichen seines Sollwerts nach Einschaltung des Reglers angesprochen wird. Sie verhindert beispielsweise, dass ein Alarmausgang mit Höchstwert beim Aufheizvorgang oder ein Alarmausgang mit Mindestwert beim ersten Überschwingen angesprochen wird. Anschliessend wird der Zusatzausgang mit Alarmunterdrückung bei jedem Erreichen seines Einstellwerts angesprochen.

## BEZUGSNORMEN

Alle Datasensor Produkte mit CE Kennzeichen entsprechen den Europäischen Richtlinien zur elektromagnetischen Verträglichkeit (EEC 89/336 mit Ergänzungen 92/31 und 93/68), den Sicherheitsbestimmungen der Niederspannungsrichtlinie (LVD 73/23 mit Ergänzungen 93/68) sowie allen einschlägigen Europäischen Richtlinien zum Einsatz derartiger Geräte in Industrieumgebungen. Die Temperaturregler beziehen sich auf die Norm EN 61010 "Sicherheitsbestimmungen für elektrische Mess-, Steuer-, Regel- und Laborgeräte". Teil 1: Allgemeine Anforderungen.