# Vorausschauende Regelsysteme für Temperaturen oberhalb der Raumtemperatur

**Die klassischen Regler P, PI, PD und PID (Proportional-Integral-Differential) haben in den letzten Jahrzehnten in vielen Bereichen der Technik für etliche messbare Größen ihren Einsatzort gefunden. Die Anwendungen reichen vom einfachen Regler im Haushalt (z.B. Heizung, Herd) bis hin zu präzisen Regelungsaufgaben in industriellen Herstellungsverfahren mit reproduzierbaren Prozessabläufen. Eine Grundeigenschaft dieser Regler aus Operationsverstärkern, Widerständen, Kondensatoren, ... ist es, die Momentanwerte nur direkt für den Regelkreis zu verwenden. Anders gesagt, der PID-Regler sieht eigentlich nur die Vergangenheit und den Augenblick, nicht aber, welchen Wert die zu regelnde Größe in einigen Sekunden oder Minuten haben wird. Das kann ein PID-Regler nicht, sondern nur ein vorausschauender Regler, der dazu den Momentanwertverlauf analysiert.**

Durch vorhandene systembedingte Reaktions- und Totzeiten im Temperaturregelkreis, Nachheizeffekte sowie stark unterschiedliche Zeitkonstanten für die Aufheiz- und Abkühlphase in Kombination mit einem großen Sollwerttemperaturbereich wird der Standard-PID-Regler daran gehindert, für alle Anforderungen die idealen Reglerparameter zu finden. Die zeitaufwändig ermittelten Reglerparameter funktionieren meistens nur für einen Arbeitspunkt, jedoch oszillieren PID-Regler leichter im oberen Temperaturbereich eines großen Sollwerttemperaturbereiches.

Zum Einstieg in die Thematik zunächst einige Voraussetzungen für eine gute Temperaturregelung:

1. Eine hochauflösende Temperaturmessung wird realisiert mit einem präzisen Temperaturmesselement (TE) gefolgt von einem hoch auflösenden und rauscharmen Messverstärker (MV), dessen Ausgangssignal ein Analog-Digital-Converter (ADC) für einen Microcontroller digital bereitstellt. Entweder wird ein spezieller MV außerhalb des ADC aufgebaut oder, wenn möglich, ein im ADC vorhandener MV genutzt. Für absolute Präzisionsmessungen hat sich die klassische Vierleiterschaltung am TE bewährt.

2. Es kann sinnvoll sein, äußere Störgrößen zu messen und diese in den Regleralgorithmus einfließen zu lassen. So kann sofort auf sie reagiert werden, bevor sie ihre störende Wirkung zeitverzögert entfalten. Als gut messbare Beispiele seien hier die Umgebungstemperatur und (Netz-)Spannungsschwankungen am Widerstandsheizelement genannt. Der technische Aufwand zur Störgrößenmessung richtet sich nach den regelungstechnischen Anforderungen und zulässigen Produktkosten.

3. Der konstruktive Aufbau der Regelstrecke hat erhebliche Einflüsse auf die Eigenschaften und die Regelbarkeit des Gesamtsystems. Der räumliche Abstand zwischen Heizelement (HE) und dem TE sollten so klein wie möglich sein, um verkettete wärmetechnische Tiefpassschaltungen aus thermischen Wärmewiderständen und Wärmekapazitäten zu minimieren. Damit bleiben Reaktions- und Totzeiten der Regelstrecke so kurz wie möglich, sind naturgemäß aber immer unvermeidbar vorhanden, da die Ausbreitung der Wärme über eine Distanz Zeit braucht. Geringe Wärmewiderstände und kleine Wärmekapazitäten schaffen immer gute thermische Bedingungen für schnelle Regelkreise.

4. Die Stellgröße muss mit hoher Auflösung dosierbar sein, um kleine Abweichungen fein ausregeln zu können.

5. Der eigentliche Regleralgorithmus läuft als mathematisches Modell in der Software des Microcontrollers ab.

Die Hardware des PID-Reglers:
Der klassische PID-Regler wurde mit Operationsverstärkerschaltungen und einer Treiberstufe für die Stellgröße realisiert. Alle Zeitkonstanten und PID-Parameter werden durch die Regler-Bauteile (Operationsverstärker, Widerstände, Kondensatoren etc.) bestimmt. Modernere, universellere PID-Regler sind per Software auf einem Microcontroller nachgebildet. Zwar sind damit die PID-Reglerparameter vom Anwender frei konfigurierbar, der jedoch erst einmal die richtige Reglerparameterkombination für seinen Regelkreis finden muss. Eine Hilfestellung bieten integrierte Automatismen in einigen Reglern, die versuchen, eine günstige Reglerparameterkombination zu ermitteln.

Numerische Problematik des Software-PID-Reglers:
Die einzelnen P-, I- und D-Komponenten können numerisch quasi beliebig hohe Werte annehmen, sofern es für sie keine numerische Bereichsbegrenzung gibt. Im Extremfall endet das Szenario im arithmetischen Überlauf von Variablentypen, womit der Regler seine saubere Funktion sofort verliert. Eine numerische Bereichsbegrenzung der P-, I- und D-Komponenten im Regler auf sinnvolle Stellgrößenwerte bringt generell regelungstechnische Vorteile.
Aber auch diese Begrenzungen sind letztlich weitere Reglerparameter, die bestimmt werden müssen. Wichtig ist, dass die Stellgröße im Wertebereich ihr Minimum und Maximum erreichen kann.

Problematik des PID-Reglers:
Der klassische PID-Regler hat den Nachteil, dass seine Reglerparameter aufwendig bestimmt werden müssen, die dann aber nur in einem eingeschränkten Temperaturbereich gut funktionieren. Für große Temperaturbereiche sind die Reglerparameter nicht mehr konstant, sondern sind mathematisch gesehen eine Funktion der Temperatur. Einfache Beipiele verdeutlichen, wie unterschiedlich der Temperaturregler reagieren muss:

a) Raumtemperatur 20°C ; Sollwert 130°C:
Die Aufheizgeschwindigkeit nimmt bei voller Heizleistung mit steigender Ist-Temperatur ab, weil immer mehr Wärme an die Umgebung abgegeben und so für das beheizte Objekt verloren geht. Die Abkühlgeschwindigkeit ist bei einer hohen Temperaturdifferenz zur Raumtemperatur wesentlich höher und erfordert eine viel schnellere Reglerreaktion, als bei einer kleinen Temperaturdifferenz.

b) Raumtemperatur 20°C ; Sollwert 21°C:
Die Aufheizgeschwindigkeit muss durch minimale Heizleistung sehr gering sein, damit ein Überheizen auf jeden Fall verhindert wird. Systembedingte Reaktions- und Totzeiten sowie Nachheizeffekte erschweren die Regelung hier besonders. Wenn hier zuviel Heizenergie in zu kurzer Zeit in die Konstruktion gelangt, ist die Überschreitung des Sollwertes garantiert. Ein einmal überheiztes System kühlt wegen der geringen Temperaturdifferenz zur Raumtemperatur nur sehr langsam ab. Der Regler muss hier langsam und vorsichtig agieren.

Der klassische PID-Regler wertet nur die Momentanwerte direkt in seiner Reglerfunktion aus. Er kann deshalb nicht erkennen, wenn er die Stellgröße z.B. aufgrund systembedingter Reaktions- und Totzeiten falsch ermittelt. Es kommt zu Temperaturüberschwingern nach der ersten Aufheizphase und/oder sogar zur Schwingneigung des Regelkreises, wenn zudem die Reglerparameter zu groß eingestellt wurden.

Im PID-Regler wird aus der Abweichung der Messgröße zum Sollwert ein Integral gebildet und die Messgröße zur Erkennung der zeitlichen Änderung differenziert, um daraus zusammen mit dem Proportionalanteil eine Stellgröße zu ermitteln. Im PID-Regler sind für die Aufheizphase und die Abkühlphase die Reglerparameter meistens gleich, wobei man eigentlich unterschiedliche Reglerparameter für jede Phase braucht. Diese entscheidende Diskrepanz führt beim PID-Regler zwangsläufig zu regelungstechnischen Kompromissen. Somit findet man für den Standard-PID-Regler eigentlich nie die idealen Reglerparameter.

Abhängigkeiten und Ursachen:
Bei allen Temperaturregelungen fließt der Wärmestrom immer zeitverzögert von der Wärmequelle in die Wärmesenken (Objekte mit geringerer Temperatur) ab.

1. Beim Aufheizen hat man andere Zeitkonstanten im Regelkreis als beim Abkühlen.
Das ist physikalisch bedingt, denn beim Aufheizen wirken die verketteten wärmetechnischen Tiefpassschaltungen aus Wärmewiderständen und Wärmekapazitäten zwischen HE und TE. Beim Abkühlen muss aber die überschüssige Wärme aus den Wärmekapazitäten des Gesamtsystems (Wärmequellen) heraus und an die Umgebung (Wärmesenke) abgegeben werden.

2. Beim Aufheizen gibt es immer ein Temperaturgefälle zwischen dem HE als Wärmequelle und dem TE als Wärmesenke, zwischen denen der Wärmestrom fließt. Durch die verketteten wärmetechnischen Tiefpassschaltungen aus Wärmewiderständen und Wärmekapazitäten zwischen HE und TE geschieht die Wärmeausbreitung immer zeitverzögert, d.h.:
a) Unmittelbar nach dem Einschalten des HE sieht der TE noch keine Wirkung.
b) Unmittelbar nach dem Abschalten des HE breitet sich noch nachträglich überschüssige Restwärme im HE in der Gesamtkonstruktion aus, die im ungünstigen Fall ausreicht, um das Gesamtsystem zu überheizen.

3. Die Umgebung ist mit ihren Wärmekapazitäten für jedes Heizsystem beim ersten Aufheizen eine Wärmesenke mit unvermeidbarem Einfluss. Es ist wegen des kalten Gehäuses zunächst mehr Heizleistung zum Erreichen des Sollwertes erforderlich als nach einiger Zeit, wenn das Gehäuse und die unmittelbare Umgebung von der Wärmequelle indirekt erwärmt wurden. Deshalb ist es wichtig, z.B. die Gehäusetemperatur oder die Lufttemperatur im Gerät zu messen und in die Regelung einzubeziehen.

4. Zugluft erzeugt turbulente Störungen gewissermaßen permanent und transportiert eine unkontrollierbare variable Wärmemenge ab, insbesondere, wenn Umgebungstemperatur und Isttemperatur weit voneinander abweichen. Da die Messtechnik für Zugluft aufwendig ist, bleibt nur, Aufstellorte mit Zugluft zu meiden, das beheizte Objekt oder das Gerät abzudecken oder unter eine Haube zu stellen. Hingegen eignet sich ein intelligent gesteuerter Lüfter, in der Abkühlphase überschüssige Wärme schneller und kontrolliert abzutransportieren.

5. Die wärmetechnische Isolation des beheizten Systems zur Umgebung mindert natürlich externe Wärmeverluste und verkürzt die Aufheizzeiten, erhöht aber gleichzeitig die Zeitkonstanten für die Abkühlphase. Somit bekommt man aus einem wärmeisolierten und überheizten System die überschüssige Wärme nur sehr viel langsamer wieder heraus. Deshalb darf der Regler möglichst nicht überschwingen, unabhängig vom Reglertyp. Extrem wird es in gut isolierten Systemen in Kombination mit einer leistungsstarken Heizung.

Thermischer Gleichgewichtszustand:

Im idealen thermischen Gleichgewichtszustand sind die P- und D-Komponenten gleich Null, während die I-Komponente exakt nur so viel Energie in das Heizsystem gibt, dass die Temperatur konstant bleibt. In einer langen Abkühlphase baut der PID-Regler sein Integral stark ab, weshalb dann später die Heizleistung beim Unterschreiten des Sollwertes nicht mehr ausreicht. Das Unterschwingen der Temperatur ist für den PID-Regler dann unvermeidbar, wobei ein extremes Absacken der Temperatur überwiegend durch den ausreichenden Proportionalanteil vermindert werden kann. Je unterschiedlicher die Zeitkonstanten der Aufheiz- und Abkühlphase sind, umso schwieriger wird es, funktionierende Reglerparameter für den PID-Regler zu finden.

Wenn man all diese physikalisch-mathematischen Abhängigkeiten des beheizten Systems und die Eigenschaften eines klassischen PID-Reglers gegenüberstellt, wird deutlich, dass der PID-Regler damit schnell überfordert wird. Hätte man eine alle Abhängigkeiten vollständig beschreibende riesige Universalgleichung, bräuchte man den Regler nicht, weil man dann zu jedem Zeitpunkt die richtige Heizleistung ausrechnen könnte, um die Ist-Temperatur auf dem Sollwert zu konstant halten. Weil man diese Universalgleichung meistens nicht hat, geschweige denn sie lösen könnte, benutzt man einen Regler, der diese Aufgabe numerisch im Regelkreis erledigt.

Diese hier allgemein beschriebenen Probleme und physikalischen Zusammenhänge sind in vielen Temperaturregelkreisen zu finden.

Bereits Mitte der 80er Jahre entwickelte der Autor dieses Artikels Dietmar Goretzki, Dipl.-Ing. bei dem mittelständischen Dienstleistungsunternehmen „dikon Entwicklungs- und Produktions GmbH, die Idee und die Grundlagen für ein vorausschauendes Temperatur-Regelungs-Verfahren. Es erkennt aus der zu regelnden physikalischen Messgröße (Regelgröße) den charakteristischen Verlauf näherungsweise und realisiert mathematisch eine zeitliche Vorausberechnung der Regelgröße. Damit weiß der Regler schon im Voraus, auf welchen Wert die Regelgröße steigt und kann so die Stellgröße rechtzeitig auf den richtigen Wert korrigieren. In der zeitlichen Vorausberechnung der Regelgröße liegen ein entscheidender Unterschied und Vorteil im Vergleich zum PID-Regler. Die Vorausberechnung ist nicht nur auf die Regelgröße, sondern auch für dynamische andere physikalische Größen bzw. Störgrößen anwendbar, dessen Messwerte in die Berechnung der Stellgröße anteilig eingehen können.

Die Umsetzung des charakteristischen Verlaufs in eine mathematische, parametrierbare Funktion ermöglicht die zeitliche Vorausberechnung der Regelgröße. Ein intelligenter Regler kann diese Parameter, ebenso wie Reaktions- und Totzeiten des Regelkreises, aus dem Verlauf der Regelgröße bestimmen. Die Reaktions- und Totzeiten geben indirekt das Abtastintervall der Regelgröße vor, mit dem der Regler arbeitet. Ist das Abtastintervall zu klein, würde der Regler verfrüht und zu stark reagieren, denn aufgrund der Reaktions- und Totzeiten hätte sich die letzte Stellgrößenänderung ja noch gar nicht ausgewirkt. Ist das Abtastintervall zu groß, würde der Regler zu spät reagieren, denn die letzte Stellgrößenänderung hat ihre Wirkung schon längst entfaltet, und die Regelgröße wäre eventuell schon übergeschwungen. Das Abtastintervall sollte bei allen Reglertypen somit nur ein wenig länger als die Reaktions- und Totzeiten sein, sonst ergibt auch die zeitliche Vorausberechnung der Regelgröße keine sinnigen Werte.

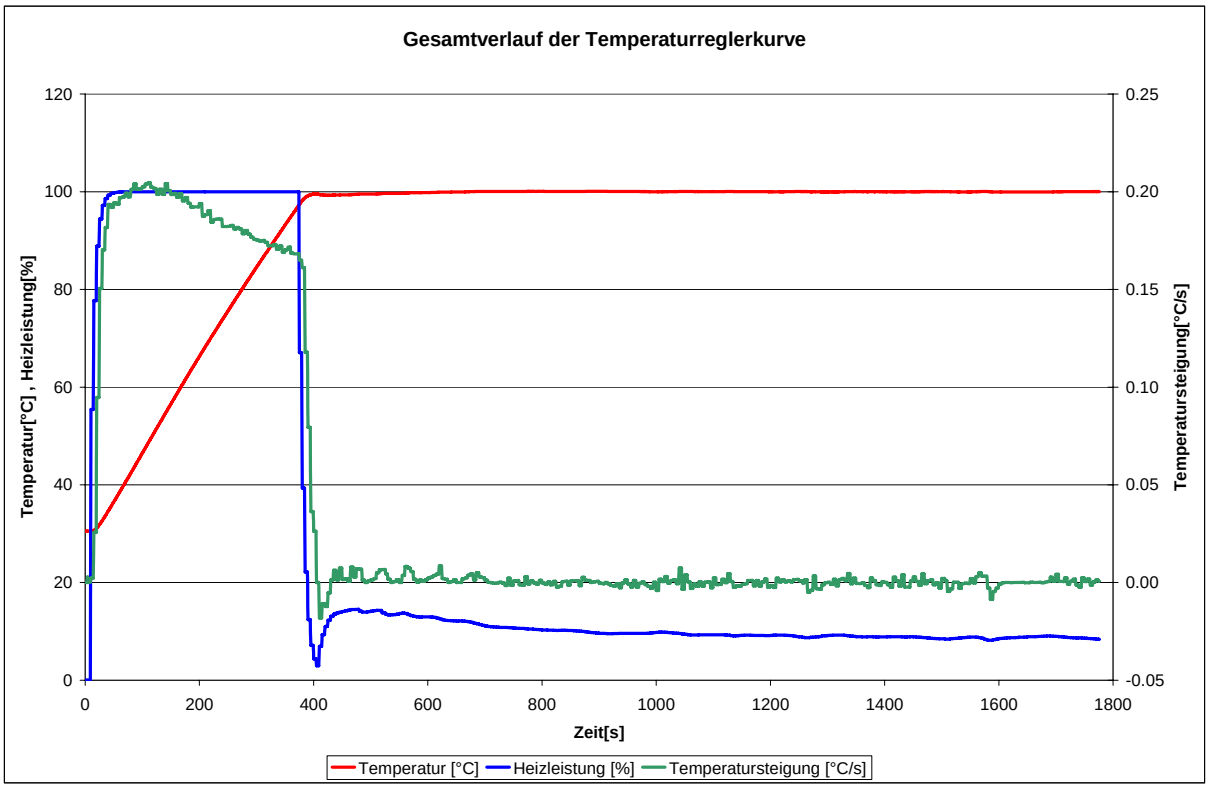
Da die Vorausberechnung zeitlich über Reaktions- und Totzeiten hinausreicht, besteht eine gute Chance, eine sehr schnelle und stabile Regelung zu erreichen, die so mit einem PID-Regler nicht zu realisieren wäre.

Ein vorausschauender Regler benutzt die vorausberechnete Regelgröße und nicht den Momentanwert zur Berechnung der Stellgröße.
Beim Aufheizen braucht man wegen der verketteten wärmetechnischen Tiefpassschaltungen unbedingt eine vorausschauende Regelung, damit die Heizleistung rechtzeitig, d.h. schon weit vor Erreichen des Sollwertes, auf die erforderlichen bzw. deutlich geringeren Werte zurückgenommen wird. Nur so wird der Nachheizeffekt in die Regelung sinnig einbezogen und ein Überheizen verhindert.
Beim Abkühlen, z.B. durch eine vom Bediener eingestellte Sollwertabsenkung, verhält es sich umgekehrt ähnlich. Die Heizung muss ganz aus sein, wenn die Regelgröße deutlich oberhalb des Sollwertes ist. Die Heizleistung muss aber schon rechtzeitig steigen, wenn die Vorausberechnung der Regelgröße ein Absinken unter den Sollwert ergibt. Nur so kommt die Heizungswärme zum richtigen Zeitpunkt am TE an, und ein Unterschwinger der Regelgröße wird vermieden.

Genau diese Vorausschau der Regelgröße kann der PID-Regler aufgrund seiner direkten Momentanwertverwendung nicht wirklich leisten, denn seine P-Komponente kehrt das Vorzeichen erst um, wenn die Abweichung bereits eingetreten ist. Auch die I-Komponente baut sich erst nach der Vorzeichenumkehr wieder auf, denn sie ist durch eine lange Abkühlphase auf stark negative Werte abgesackt. Die I-Komponente kann sich beim PID-Regler nicht schnell genug wieder aufbauen, d.h. die Reaktion der Stellgröße kommt zu viel spät. Der Unterschwinger der Regelgröße würde beim Abkühlen zwangsläufig auftreten. Der Differentialanteil hat bei sehr langsamen Regelgrößenänderungen naturgemäß nur eine geringe Wirkung, denn er soll die Präzision bei kleinen schnellen Änderungen beim PID-Regler bringen. Ein zu hoch eingestellter D-Parameter macht den PID-Regler schnell instabil, weil quasi alle Rauschanteile und kleinste Änderungen der Regelgröße mit zu hoher Verstärkung die Stellgröße empfindlich ändern.

Die Vorteile und Unterschiede der vorausschauenden Regelung im Vergleich zum PID-Regler sind hier in Bezug auf Temperaturregelkreise allgemein dargestellt. Nebenbei sei erwähnt, dass vorausschauende Regelverfahren sich natürlich auch auf andere physikalische Größen anwenden lassen. Die praktische Realisierung des Verfahrens erfolgte im Jahr 2005 in einem Seriengerät mit einem Temperaturregelkreis. Im Temperaturmessbereich von ca. -10°C...+140°C ermöglicht die vorausschauende Regelung eine Stabilität von ±0.05°C bei einem Sollwert oberhalb der Raumtemperatur. Nur die Geräteinnentemperatur geht als gemessene Störgröße in die Regelung ein.
Für die kleine restliche Instabilität sind einfache Ursachen bekannt:
a) Die Widerstandsheizung wird im genannten Gerät direkt aus der Netzspannung geheizt, die aber als Störgröße nicht gemessen wird. In die Heizleistung $P=U*I=U^2/R$ gehen Netzspannungsschwankungen quadratisch ein, weil sich gleichzeitig der Strom ändert.
b) Die effektive Auflösung des ADC entscheidet, welche minimalen Regelgrößenänderungen für den Regler noch erkennbar und ausregelbar sind.

Das folgende Diagramm zeigt, dass der vorausschauende Regler schon 2.6°C vor dem Erreichen der Solltemperatur (100°C) die Heizleistung (blaue Kurve) von 100% auf sehr kleine Werte rasch zurücknimmt, um ein Überschwingen durch Nachheizeffekte zu vermeiden. Die Solltemperatur hat nach ca. 400s Aufheizzeit ein Toleranzband von ±0.6°C erreicht. Mit der Zeit sinkt das Toleranzband deutlich unter ±0.1°C. Am Verlauf der Heizleistung lässt sich erkennen, dass das thermische Gleichgewicht des Gesamtsystems erst nach ca. 1.500s erreicht wurde, weil z.B. das Gerätegehäuse, physikalisch bedingt durch indirekte Erwärmung, erst jetzt eine konstante Temperatur erreicht hat.




Eine Modifikation des vorausschauenden Reglers für andere Anwendungen ist per Hard- und Software realisierbar. Der Reglereinsatz muss nicht auf Temperaturregelungen beschränkt bleiben, sondern wäre dann auch für andere physikalische Messgrößen verwendbar. Ebenso kann man die Vorausschau eines Messwertes im Allgemeinen in der Messtechnik einsetzen.

Eine ausführliche Version dieser Veröffentlichung ist auf der Internetseite der „dikon Entwicklungs- und Produktions GmbH“ zu lesen (www.dikon-elektronik.de unter dem Menüpunkt „News“), die als Dienstleister kundenspezifisch eine entsprechende Elektronik erarbeitet und in Serie produziert. Ansprechpartner ist die dikon-Entwicklungsabteilung.

Dipl.-Ing. Dietmar Goretzki
Leiter Entwicklung „dikon Entwicklungs- und Produktions GmbH“

Weitere Informationen:

dikon Entwicklungs- und Produktions GmbH
Dietmar Goretzki
Industriestr. 8
37079 Göttingen
Tel. 0551/5048-33
goretzki@dikon-elektronik.de
www.dikon-elektronik.de