

Technischer Hinweis: EN0077 Methoden zur Feuchteregulierung in Dosieranlagen

Zusammenfassung: Skizziert Methoden zur Feuchteregelung für Dosieranlagen

Betroffene Produkte: Alle Produkte

Änderungsdatum: 15/10/2024 Autor: S. Cook

1 Zusammenfassung:

Dieser technische Hinweis erläutert die Methoden der Feuchteregelung für Dosieranlagen. Eine Dosieranlage besteht in der Regel aus mehreren Rohstoffsilos oder -behältern und einem Mischer, der diese Materialien zu einem Endprodukt kombiniert.

Dieses Dokument verwendet durchgängig das internationale Einheitensystem. Es geht auch davon aus, dass das spezifische Gewicht von Wasser 1 ist. Änderungen des spezifischen Gewichts von Wasser bei unterschiedlichen Temperaturen wurden nicht berücksichtigt, da diese Änderungen vernachlässigbar sind.

2 Silos und Trichter

Formulierungen oder Rezepturen werden am häufigsten durch das Trockengewicht eines Materials spezifiziert. In der Praxis ist es durchaus üblich, dass Materialien Feuchte enthalten. Dies wirkt sich auf das Gewicht des Materials und seine Schüttdichte aus. Diese Änderung der Schüttdichte ist entweder darauf zurückzuführen, dass sich die Partikel selbst ausdehnen, z. B. Saatgutkörner, oder dass das Material seine Oberflächenspannung verändert, z. B. Sand, der bei bestimmten Feuchtegehalten verklumpt.

2.1 Dosierung nach Volumen

Die Volumenänderung durch Feuchte ist schwer zu messen. Oft ist sie nichtlinear und die Korrelation der korrekten Einstellung auf der Grundlage der Feuchte ist daher sehr schwierig zu erreichen. Hydronix empfiehlt, volumetrische Systeme durch Wiegesysteme zu ersetzen.

2.2 Dosierung nach Gewicht

Die Gewichtsveränderung durch Feuchte ist eine lineare Veränderung. Es stimmt zwar, dass sich das spezifische Gewicht des Wassers mit der Temperatur ändert, aber praktisch gesehen kann es als eine Konstante von 1 behandelt werden. Dies vereinfacht den Regelprozess, da 1 Liter Wasser als 1 kg angesehen werden kann.

Beispiel:

Materialgewicht 1.000 kg

Feuchtegehalt = 10 %

$1.000 \times 0,1 = 100 \text{ kg Wasser}$

Spezifisches Gewicht von Wasser bei 0 °C (Ref.temp. 20 °C) = 1,002

$100 \text{ kg} / 1,002 = 99,8 \text{ l}$

Spezifisches Gewicht von Wasser bei 37,8 °C (Ref.temp. 20 °C) = 0,995

$100 \text{ kg} / 0,995 = 100,5 \text{ l}$

Diese Änderung ist geringer als die erzielbare Genauigkeit eines industriellen Gewichtsdosiersystems. Daher nimmt der Rest dieses Dokumentes eine spezifische Dichte für Wasser von 1 an. Es wird auch davon ausgegangen, dass alle Materialdaten gegen diese Annahme referenziert sind.

Damit Gewichtsdosiersysteme Material genau und zeitsparend wiegen können, ist es notwendig, zunächst einen großen Teil des Materials, die so genannte Hauptdosis, zu dosieren, das dosierte Material zu wiegen und dann den verbleibenden Materialbedarf durch eine Reihe von Feindosierungen langsamer hinzuzufügen. Eine Feindosierung ist das Öffnen des Gatters für einen kurzen Zeitraum, das Durchlassen einer kleinen Menge Materials und das Schließen des Gatters. Das Material wird nach jeder Feindosierung gewogen, bis die gewünschte Materialmenge zugegeben wurde.

Die Feuchteregeung kann ohne Nachteile für die Gesamtdosierzeit in diesen Prozess integriert werden. Der Endgewichtssollwert kann vor der Feindosierung eingestellt werden. Dies hängt von der zu erwartenden Feuchteschwankung des Materials ab. Die Hauptdosis sollte auf einen geringeren Wert als derjenige des Feuchtebereichs des Materials eingestellt werden. Da das Wägen an diesem Punkt weniger genau ist, ist es sinnvoll, eine Toleranz von 5 % auf den Wert zu addieren, um ein Über- oder Unterschreiten des Sollwerts zu berücksichtigen.

Beispiel:

Trockenste zu erwartende Feuchte = 3 %

Nasseste zu erwartende Feuchte = 18 %

Toleranz = 5 %

Feuchtebereich = 18 – 3 = 15 %

Hauptdosis = 100 – 15 – 5 = 80 %

Während der Hauptdosis ist es wichtig, die Feuchtemessungen des Sensors zu mitteln. Die Feuchte schwankt im Laufe der Dosis und die Kompensation sollte auf der Gesamtfeuchte basieren und nicht auf einem einzigen Messwert am Ende der Charge.

Die Mittelwertbildung sollte mit Hilfe der Funktion Mittelwertbildung/Halten erfolgen, die von Hydronix-Sensoren bereitgestellt wird. Dadurch werden Fehler vermieden, die beim Lesen von Sensorausgängen über die analoge Schleife, von Ausgaben wie Rauschen auf dem Kabel oder der Auflösung eines Analogkarteneingangs verursacht werden können.

Die Mittelwertbildung im Sensor kann entweder durch Anlegen des Digitaleingangs an den Sensor oder über die RS485-Verbindung genutzt werden.

Nach der Hauptdosis wird der gemittelte Wert gehalten und kann vom Sensor abgefragt und der endgültige Gewichtssollwert kann eingestellt werden. Um das tatsächliche Gewicht des zu wiegenden Materials zu berechnen, sollte die folgende Formel verwendet werden:

$$T = T_d(100 \% + M \%)$$

Abbildung 1: Nassgewichtberechnung

Dabei sind:

T = Gesamtgewicht des hinzuzufügenden Materials

T_d = Trockengewicht des für die Dosis benötigten Materials

M = Materialfeuchte (NB: 100 % = 1, M % = Feuchte/100)

Beispiel:

Sollwert Trockengewicht des Materials = 1.000 kg

Hauptdosis = 80 %

Hauptdosissollwert = 1.000 x 0,8 = 800 kg

Aktuelles Hauptdosisgewicht = 780 kg (einen Wägefehler berücksichtigend)

Durchschnittliche Feuchte = 10 %

Endgültiger Sollwert = 1.000 x (100 % + 10 %) = 1.000 x (1 + 0,1) = 1.100 kg

2.2.1 Regelverfahren

Für Systeme, in denen der Trichter bzw. das Silo immer nur ein einzelnes Material aufnehmen kann, empfiehlt es sich, die Kalibrierung im Sensor durchzuführen und den Ausgang des Sensors so einzustellen, dass er eine durchschnittliche Feuchte liefert. Für Systeme, die zu unterschiedlichen Zeiten mehrere Materialien aufnehmen können, empfiehlt es sich, den Ausgang für den Sensor auf durchschnittlich unskaliert zu stellen. Die Kalibrierung muss dann in der Steuerung erfolgen.

Pseudocode für den Trichter/Silo-Dosierprozess, bei dem der Sensor so konfiguriert ist, dass er Feuchte ausgibt.

1. Stellen Sie den Hauptdosissollwert auf einen Prozentsatz des Endsollwertes ein, der ein Überschwingen plus Feuchtevariation zulässt (Anmerkung: Im obigen Beispiel waren es 80 %).
2. Öffnen Sie das Hopper-/Silo-Gatter.
3. Starten Sie die Mittelwertbildung im Sensor entweder durch Anlegen des Digitaleingangs oder durch Senden des Startbefehls über RS485.
4. Halten Sie das Gatter geöffnet, solange die Waage weniger als den Sollwert misst, bis das Sollgewicht erreicht ist.
5. Stoppen Sie die Mittelwertbildung im Sensor entweder durch Trennen des Digitaleingangs oder durch Senden des Stoppbefehls für die Mittelwertbildung über RS485.
6. Schließen Sie das Hopper-/Silo-Gatter.
7. Nehmen Sie den durchschnittlichen Feuchtwert des Sensors und berechnen Sie das endgültige Sollgewicht mit Hilfe der Gleichung in Abbildung 1.
8. Öffnen und schließen Sie das Tor für kurze Zeiträume (Feindosierung), während die Waage einen kleineren Wert als den Endsollwert misst, bis der Endsollwert innerhalb einer akzeptablen Toleranz liegt.

Bei Systemen, die mehrere Kalibrierungen durchführen müssen, ist es notwendig, die Feuchte aus dem unskalierten Wert zu berechnen. Dies ist einfach, da die Reaktion des Sensors auf die Feuchtezufuhr linear ist.

$$\text{Feuchte \%} = B \cdot \text{unskaliert} + C - D$$

Abbildung 2: Feuchteberechnung aus unskaliertem Wert

Dabei sind:

B = Unskalierte Änderung je Feuchte-%-Änderung (Gradient)

C = Offset (theoretischer unskalierter Wert, wenn Feuchte = 0)

D = Adsorptionswert

Anmerkung: Der D-Wert wird nur benötigt, wenn die freie Feuchte angezeigt werden soll und nicht die Gesamtheuchte. Sonst kann er auf 0 gesetzt werden.

2.2.2 Materialkalibrierung

Während der Materialkalibrierung sollten der Feuchtegehalt des Materials und der unskalierte Wert bei dieser Feuchte an mehreren Stellen erfasst werden, vorzugsweise über den gesamten Arbeitsbereich des Materials. Der Arbeitsbereich des Materials liegt zwischen der geringstmöglichen Materialfeuchte während der Produktion und der höchsten. Es wird

empfohlen, mindestens 3 Punkte über den Arbeitsbereich hinweg zu haben. Hydronix-Sensoren können nicht verwendet werden, um Feuchtwerte unterhalb des Wasseradsorptionswertes eines Materials zu messen, weshalb es empfehlenswert ist, Materialien oberhalb dieses Wertes zu halten.

Beispiel:

Ein Sand hat einen Wasseradsorptionswert von 1,5 %. Er ist bei 16 % gesättigt.

In der Produktion wird der Sand über 2 % gehalten und dem Prozess über 8 % zu viel Wasser zugegeben.

Der Arbeitsbereich beträgt somit 2–8 %.

Es sollten für den Sand bei ca. 2, 5 und 8 % Proben entnommen werden.

Um die B- und C-Werte aus mehreren Punkten zu berechnen, ist Regression mit linearen kleinsten Quadraten vielleicht die häufigste Methode, obwohl es viele Methoden gibt. Diese Methode wird von Hydronix empfohlen.

$$B = \frac{\sum \text{Feuchtwerte} \cdot \text{Unskalierte Werte} - \left(\frac{\sum \text{Feuchtwerte} \cdot \sum \text{Unskalierte Werte}}{\text{Anzahl von Punkten}} \right)}{\sum \text{Unskalierte Werte}^2 - \left(\frac{\sum \text{Unskalierte Werte} \cdot \sum \text{Unskalierte Werte}}{\text{Anzahl von Punkten}} \right)}$$

Abbildung 3: Berechnung des B-Wertes

$$C = \frac{\sum \text{Feuchtwerte} - B \cdot \sum \text{Unskalierte Werte}}{\text{Anzahl von Punkten}}$$

Abbildung 4: Berechnung des C-Wertes

Beispiel

Unskal.	Feuchte
20	2
30	5
40	8

$$B = \frac{((20 \cdot 2) + (30 \cdot 5) + (40 \cdot 8)) - ((2 + 5 + 8) \cdot (20 + 30 + 40) / 3)}{(20^2 + 30^2 + 40^2) - ((20 + 30 + 40) \cdot (20 + 30 + 40) / 3)}$$

$$B = \frac{510 - (15 \cdot 90 / 3)}{(400 + 900 + 1600) - (90 \cdot 90 / 3)}$$

$$B = 60 / (2900 - 2700)$$

$$B = 60 / 200$$

$$B = 0,3$$

$$C = \frac{(2 + 5 + 8) - 0,3 \cdot (20 + 30 + 40)}{3}$$

$$C = (15 - 27) / 3$$

$$C = -4$$

3 Mischer

Feuchterege­lung in Mis­chern be­steht in der Regel aus der Zu­gabe von Was­ser bis zu einem Soll­wert. Dies kann ent­we­der mit Hilfe einer Be­rech­nungs­me­thode oder mit Hilfe eines Ver­fah­rens mit Rie­sel­zu­fö­hrung ge­sche­hen. Eine Be­rech­nungs­me­thode be­steht da­rin, die Ma­te­ri­al­feuch­te zu mes­sen und dann die Was­ser­men­ge zu be­rech­nen, die in einer Do­sis zu­ge­ge­ben wer­den muss.

Das Be­rech­nungs­ver­fah­ren er­for­dert ge­naue Ma­te­ri­al­tro­ckengewichte.

Das Ver­fah­ren mit Rie­sel­zu­fö­hrung ist wider­stands­fö­higer ge­gen un­ge­naue Tro­ckengewichte, aber lang­sa­mer als die Be­rech­nungs­me­thode.

Beim Ver­fah­ren mit Rie­sel­zu­fö­hrung muss ein kon­stan­ter Was­ser­druck zur Ver­fö­gung ste­hen.

Dieses Do­ku­ment be­handelt die Re­gelungs­pro­zes­se der ein­zel­nen Me­tho­den. Wei­tere Er­läu­te­run­gen zur Ver­wen­dung der ein­zel­nen Ver­fah­ren fin­den Sie in den Ka­pi­te­ln 4 und 5 von HD1048, der Be­die­nungs­an­lei­tung Hy­dro­-Con­trol (HC07).

In HD1048 wird der Be­rech­nungs­mo­dus als „CALC“-Mo­dus be­zeich­net. Das Ver­fah­ren mit Rie­sel­zu­fö­hrung wird als „AUTO“-Mo­dus be­zeich­net.

Es ist wich­tig, da­rauf hin­zu­wei­sen, dass das Mi­schen im Ge­gen­satz zu Tri­chtern und Si­los, die nor­mal­er­wei­se zu einer Zeit nur ein ein­zel­nes Ma­te­ri­al auf­neh­men, das Mi­schen von Ma­te­ri­alien be­in­hal­tet.

Eine Ma­te­ri­al­mi­schung kann als ein Ma­te­ri­al be­trach­tet wer­den, solan­ge die ein­zel­nen Ma­te­ri­alien im glei­chen Ver­höltnis zu­ei­nan­der ste­hen und ge­nö­gend Zeit ha­ben, um sich zu ver­mi­schen und ho­mo­gen zu wer­den. Eine Ma­te­ri­al­mi­schung wird je nach In­dus­tri­e­typ ge­wö­hn­lich als Re­zeptur oder For­mu­lie­rung be­zeich­net. Diese sind im Wesen­tli­chen das Gleiche.

Ein Mi­sch­zy­klus be­steht aus:

1. Hin­zu­fü­gen von Ma­te­ri­al
2. Ma­te­ri­al­mi­schung bis zum Er­rei­chen eines sta­bi­len Sig­nals
3. Zu­gabe von Was­ser
4. Mi­schung von Ma­te­ri­al und Was­ser bis zum Er­rei­chen eines sta­bi­len Sig­nals
5. Ent­lee­ren des Ma­te­ri­als

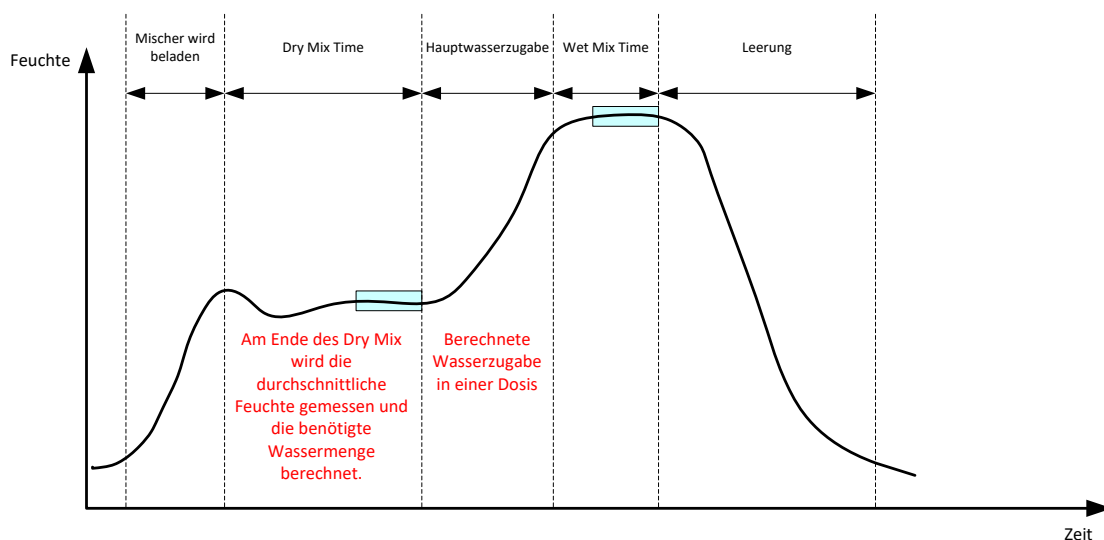


Abbildung 5 – Mischzyklus

Es kann erforderlich sein, die Schritte 2–4 zu wiederholen, wenn in verschiedenen Stufen verschiedene Materialien zugegeben werden müssen oder wenn die Zugabe von Materialien (z. B. Metallen) das Sensorsignal negativ beeinflusst.

3.1 Anwendung der Berechnungsmethode

Um zu berechnen, wie viel Wasser hinzugefügt werden kann, sollte der unskalierte Sensorwert verwendet werden. Um die Berechnung durchführen zu können, muss dem Bediener die Möglichkeit gegeben werden, eine manuelle Methode zu verwenden, bei der eine vorgegebene Wassermenge hinzugefügt werden kann, basierend auf dem Rezepturdesign und dem Wissen des Bedieners über den Feuchtegehalt der zugeführten Materialien. Auf diese Weise kann der Bediener eine Referenzmischung erstellen. Abbildung 6 zeigt den Prozess der Referenzmischung

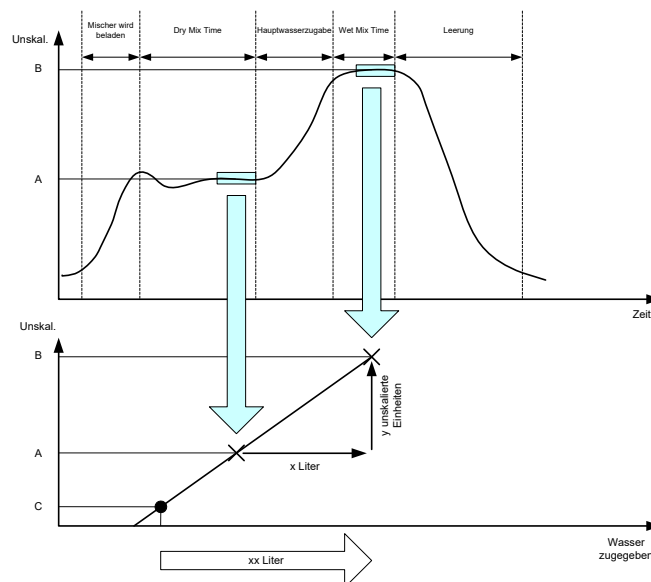


Abbildung 6: Die Kalibrierpunkte aus dem Mischzyklus

Am Ende der Trockenmischzeit und am Ende der Nassmischzeit wird eine stabile Messung erreicht. Es wird empfohlen, das Signal des Sensors mindestens fünf Sekunden lang zu mitteln.

Die unskalierte Änderung pro Einheit der Feuchtezunahme (die Steigung des Graphen) kann wie in Abbildung 7 dargestellt berechnet werden.

$$B = \frac{100 \cdot \text{Wasser}}{\text{Trockengewicht}(\text{Unskaliert}_{\text{nass}} - \text{Unskaliert}_{\text{trocken}})}$$

N. B.: der Wert 100 ist ein Skalierungsfaktor, damit der B-Wert in der Gleichung von Abbildung 2 verwendet werden kann.

Abbildung 7: Berechnung des Wasserzugabegradienten

Es ist zu beachten, dass das Trockengewicht das Gesamtrockengewicht aller zugefügten Materialien ist, mit Ausnahme des Wassers und der Feuchte, die bereits im zugeführten Material vorhanden sind.

In der Rezeptur sollten der Nassmischwert und der B-Wert für die Verwendung während der Produktion aufgezeichnet werden. Um zu berechnen, wie viel Wasser zu einer Trockenrezeptur oder einer Formulierung hinzuzufügen ist, kann die Gleichung in Abbildung 8 verwendet werden.

$$\text{Wasserbedarf} = \frac{\text{Trockengewicht} \cdot B (\text{Unskaliert}_{\text{Sollwert}} - \text{Unskaliert}_{\text{Strom}})}{100}$$

Note: Der Wert 100 ist ein Skalierungsfaktor, damit der B-Wert in der Gleichung von Abbildung 2 verwendet werden kann.

Abbildung 8: Berechnung des Wasserbedarfs während einer Mischung

Um einen Feuchtwert zu berechnen, muss ein Offset angewendet werden. Die Berechnung eines Offsets setzt voraus, dass der Anwender den endgültigen Feuchtwert angibt. Dies kann entweder durch Laborversuche am fertigen Produkt erreicht werden oder, falls dies nicht möglich ist (z. B. bei der Betonherstellung, wo eine chemische Reaktion beginnt, Wasser in eine andere Substanz umzuwandeln), kann der Feuchtegehalt mit Hilfe von Abbildung 9 berechnet werden.

$$\% \text{Endfeuchte} = \frac{100 (\text{Wasser in Rohmaterialien} + \text{während Mischung zugefügtes Wasser})}{\text{Gesamtrockengewicht der Materialien}}$$

Abbildung 9: Berechnung der Endfeuchte des Produktes

Um den unskalierten Wert des Sensors für die Anzeige in Feuchtegehalt umzurechnen, muss ein Offset berechnet werden, wie in Abbildung 10 dargestellt.

$$C = \text{Feuchte}_{\text{Ziel}} - \text{Unskaliert}_{\text{Sollwert}} \cdot B$$

Abbildung 10: Berechnung des Offsets für die Kalibrierung

Es ist dann möglich, die Feuchte mit Hilfe der Gleichung in der Abbildung 2 darzustellen.

3.2 Anwendung des Verfahrens mit Rieselzuführung

Die effektivste Form des Verfahrens mit Rieselzuführung besteht darin, den Wasserdurchsatz so zu ändern, dass zu Beginn der Wasserzugabe der Durchfluss hoch ist und reduziert wird, wenn der Feuchtegehalt der Rezeptur sich an die Sollwertfeuchte annähert, um den Sollwert nicht zu überschreiten. Der häufigste Weg, dies zu tun, ist der Einsatz eines Proportional-Integral-Differential-Reglers (PID-Controller). Die meisten SPS-Systeme bieten PID-Regler als integrierte Funktionsblöcke.

Für eine ausführlichere Erklärung eines PID-Reglers siehe HD1048 Kapitel 9 Abschnitt 3.3.

Wenn das Mischersystem mit einem Proportionalventil ausgestattet ist, ist dies relativ einfach zu bewerkstelligen: Das System sollte einen Proportional-Verstärkungswert, einen Integral-Verstärkungswert und einen Differential-Verstärkungswert speichern. Da sich Mischsysteme nicht von einem Überschwingen (zu viel Wasser) erholen können, sollte der Differentialwert auf 0 gesetzt werden.

Der Regelausgang für das Proportionalventil kann dann nach folgender Gleichung berechnet werden.

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Dabei gilt:

K_p : Proportionalverstärkung, ein Abstimmparameter

K_i : Integralverstärkung, ein Abstimmparameter

K_d : Differentialverstärkung, ein Abstimmparameter

e : Fehler = Sollwert (Unskaliert) – Istwert (Unskaliert)

t : Zeit oder Momentanzzeit (die Gegenwart)

T : Variable der Integration; nimmt Werte von Zeit 0 bis zur Gegenwart an t .

MV(t) = Manipulierte Variable (oder Regelausgang). Diese ist bei einem Ventil auf 0–100 begrenzt.

Im Wesentlichen ist der Proportionalanteil ein einfaches Fehlerverhältnis, daher gilt: je größer die Abweichung, desto größer die Antwort. Der Integralanteil ist die Fehlersumme über die Zeit. Je länger eine Abweichung besteht, desto größer ist die Antwort auf den Fehler. Der abgeleitete Teil stellt die Änderungsrate der Abweichung dar. Wenn die Änderungsrate der Abweichung hoch ist, dann ist die Antwort der Differentialgröße höher. Am deutlichsten wird dies beim Überschwingen bemerkt, wenn die Änderungsrate des Fehlers in die falsche Richtung beschleunigt wird, wodurch die Aggressivität der Schleife verringert wird.

Beispiel

Sollwert = 50 Unskaliert
 Proportionalverstärkung, $K_p = 5$
 Integralverstärkung, $K_i = 0,1$
 Differentialverstärkung, $K_d = 0$

Bei Zeit, $t = 0$
 Strom unskaliert = 30

$$\begin{aligned} MV(t) &= 5(50 - 30) + 0,1(50 - 30) + 0(50 - 30) \\ MV(t) &= 100 + 2 + 0 \\ MV(t) &= 102 \end{aligned}$$

>MV(t) Grenze, daher Regelausgang (C.O) = 100

@t=1
 Strom unskaliert = 40

$$\begin{aligned} MV(t) &= 5(50 - 40) + 0,1(50 - 40) + 0,1(50 - 30) + 0(50 - 40) \\ MV(t) &= 50 + 1 + 2 + 0 \\ MV(t) &= 53 \\ C.O &= 53 \end{aligned}$$

@t=2
 Strom unskaliert = 45 (reduzierte Erhöhung, da C.O nun < 100 ist)

$$\begin{aligned} MV(t) &= 5(50 - 45) + 0,1(50 - 45) + 0,1(50 - 40) + 0,1(50 - 30) + 0(50 - 48) \\ MV(t) &= 25 + 0,5 + 1 + 2 + 0 \\ MV(t) &= 28,5 \\ C.O &= 28,5 \end{aligned}$$

@t=3
 Strom unskaliert = 50
 $MV(t) = 5(50 - 50) + 0,1(50 - 50) + 0,1(50 - 45) + 1(50 - 40) + 0,1(50 - 30) + 0(50 - 50)$
 $MV(t) = 0 + 0 + 0,5 + 1 + 2 + 0$
 C.O = 3,5

An diesem Punkt ist der Sollwert erreicht und das Ventil kann abgeschaltet werden. Wäre keine Integralverstärkung verwendet worden, wäre das Ventil bei Annäherung des Stromwertes an den Sollwert stärker abgeschaltet worden, was den Anstieg deutlich verlangsamt hätte. Dies führt zu längeren Wasserzugabe-Zeiten, ist aber weniger anfällig für Überschwingen. In Prozessen, in denen etwas Wasser verloren geht, je länger das Mischen dauert, wird diese Integralverstärkung

die Aggressivität der Schleife im Laufe der Zeit erhöhen, um den durch Verluste verursachten Offset effektiv zu eliminieren.

Da die meisten Mischersysteme es sich nicht leisten können, bei Zugaben Überschwingen zu zeigen, ist es notwendig, einen Totzonenbereich einzuführen. Dies ist in der Regel ein Offset zum echten Sollwert, um ein Überschwingen zu verhindern. Wenn beispielsweise der Sollwert 5 % Feuchte war, könnte ein Offset von 0,2 % eingeführt werden, um den Regler bei 4,8 % zu stoppen. Dies kompensiert die Zeit zwischen der Zugabe von Wasser und der Zeit, die das Wasser benötigt, um sich einzumischen und vom Sensor gemessen zu werden.

Bei Systemen, die nur digitale Ventile anstelle von Proportionalventilen besitzen, ist es notwendig, ein Proportionalventil so gut wie möglich nachzuahmen. Eine einfache Methode, dies zu tun, wird im folgenden Beispiel gezeigt

Beispiel

1. *Definieren einer Zykluszeit, z. B. die Zeit, die benötigt wird, um ein Ventil von aus nach ein und wieder zurück in die Stellung aus zu schalten.*
2. *Definieren einer Regelperiode, z. B. 5 Zyklusperioden.*
3. *Nach jeder Regelperiode wird $MV(t)$ berechnet.*
4. $80 < MV(t) \leq 100 =$ Ventil bleibt 5 Zyklusperioden eingeschaltet
 $60 < MV(t) < 80 =$ Ventil bleibt für 4 Zyklusperioden eingeschaltet für 1 Zyklusperiode ausgeschaltet
 $40 < MV(t) \leq 60 =$ Ventil bleibt 3 Zyklusperioden eingeschaltet und für 2 Zyklusperioden ausgeschaltet
 $20 < MV(t) \leq 40 =$ Ventil bleibt 2 Zyklusperioden eingeschaltet und für 3 Zyklusperioden ausgeschaltet
 $0 < MV(t) < 20 =$ Ventil bleibt für 1 Zyklusperiode eingeschaltet für 4 Zyklusperioden ausgeschaltet

Wie bei allen PID-Reglern sind einige Experimente erforderlich, um Werte zu erhalten, die eine optimale Leistung für das Mischsystem erzielen.