

# Hoofdstuk 1

## Toepassingen van regeltechniek

### Leerdoelen

Na bestudering van dit hoofdstuk kan de student:

- het verschil tussen regeltechniek en besturingstechniek omschrijven;
- een aantal voorbeelden van regelsystemen benoemen;
- een aantal beperkingen en problemen met regelsystemen benoemen.

### 1.1 Besturen en regelen

Veel processen worden automatisch bestuurd door een microcomputer- of PLC-besturing.

Een wasmachine heeft bijvoorbeeld een programma dat doorlopen wordt, waarbij de besturing ervoor zorgt dat op het juiste moment water wordt ingelaten, de verwarmingselementen aangezet worden, de motor gaat draaien, enzovoorts. Voor het wassen wordt een bepaalde watertemperatuur gekozen. Als de trommel gevuld is met water zal de besturing de verwarmingselementen aanzetten. Een vaste opwarmtijd voldoet niet omdat de begintemperatuur niet altijd hetzelfde is. Er wordt daarom gemeten of de juiste temperatuur is bereikt, waarna het verwarmingselement wordt uitgezet. Het geven van deze besturingscommando's, eventueel afhankelijk van de signalen van sensoren, is het gebied van de **besturingstechniek**.

Als de verwarming van de wasmachine niet eenmalig aan- en uit wordt gezet, maar de temperatuur gedurende het wasproces wordt gemeten en bijgestuurd, dan is er sprake van het **regelen** van de watertemperatuur. Het voordeel van het continu regelen van de watertemperatuur is in dit geval dat de temperatuur steeds ongeveer gelijk is aan de ingestelde temperatuur, waardoor het optimale wasresultaat mogelijk is zonder dat de kleding te warm wordt.

De algemene definitie van regeltechniek is: *de regeltechniek bestudeert het dynamisch gedrag van een systeem over de tijd en probeert dit te sturen.*

### 1.2 Voorbeelden van regelsystemen buiten de techniek

Met de nodige voorzichtigheid is de regeltechniek behalve in de techniek ook toepasbaar in de biologie, economie en maatschappij (sociologie).

#### In de biologie: de warmtehuishouding in het lichaam

Het menselijk lichaam bevat een soort thermostaat (hypothalamus) die normaal gesproken ervoor zorgt dat de lichaamstemperatuur rond de 37 °C blijft. Als je een infectie hebt,

staat deze thermostaat hoger omdat het afweersysteem dan beter werkt en ziekteverwekkers vaak slecht tegen een hogere temperatuur kunnen. Als de temperatuur hoger wordt dan de gewenste waarde, bijvoorbeeld door zwaar lichamelijk werk, gaat er meer bloed naar de huid, waardoor het bloed afkoelt. Ook wordt zweet aangemaakt. Door de verdamping van het zweet wordt warmte onttrokken aan het lichaam.

Als de lichaamstemperatuur te laag is gaat er minder bloed naar de huid (waardoor het bloed minder afkoelt) en gaat het lichaam rillen (waardoor de spieren warmte aanmaken).

### **In de economie: inflatie en rentepercentage**

De Europese Centrale Bank probeert de inflatie binnen bepaalde grenzen te houden. Als er signalen zijn dat de inflatie te hoog wordt, zal de rente worden verhoogd. Hierdoor wordt er minder geld geleend en is er minder geld beschikbaar om dingen te kopen, zodat de prijsstijging geremd wordt. De mogelijkheden om de inflatie te beperken zijn wel beperkt, omdat een hogere rente in Europa mogelijk niet voldoende is om bijvoorbeeld de olieprijs wereldwijd te laten zakken.

### **In de economie: pieken en dalen in economische groei afvlakken**

Sinds Keynes (*Algemene Theorie van Werkgelegenheid, Interest en Geld*, 1936) zijn veel economen het er over eens dat een regering in economisch goede tijden een overschot zou moeten opbouwen, om in mindere tijden de economie te kunnen stimuleren om daarmee een dempende werking uit te oefenen op de economische fluctuaties. Vaak is de verleiding bij economische voorspoed groot om toch veel geld uit te geven. Hierdoor is er bij tegenspoed onvoldoende geld om de economie te stimuleren.

### **In de maatschappij: De kwaliteit van het onderwijs**

Regelmatig vinden er metingen plaats, waarbij we de 'kwaliteit van het onderwijs' proberen te meten. Meestal komen we er dan achter dat er iets mis is. Bijvoorbeeld: afgestudeerden hebben wel veel kennis van techniek maar kunnen hun ideeën niet goed 'verkopen'. Vervolgens komt er in het onderwijs veel aandacht voor communicatie, samenwerking et cetera. Als dan na jaren gemeten wordt hoe de afgestudeerden functioneren, komen we tot de conclusie dat ze weliswaar goed communiceren, maar te weinig kennis van zaken hebben, waarna er in het onderwijs weer de nadruk moet worden gelegd op de techniek.

Hoewel het interessant kan zijn om niet-technische systemen met een regeltechnische blik te bestuderen en te beoordelen, richt dit boek zich op regeltechniek voor technische systemen.

## **1.3 Voorbeelden van technische regelsystemen**

### **In huis: de centrale verwarming**

Het centraleverwarmingssysteem zorgt, als het goed is, voor een comfortabele temperatuur in het gehele huis. Bij de meeste huizen gebeurt dit door een cv-ketel en een pomp die warm water door het huis laat stromen. In de verschillende ruimtes zijn radiatoren aangebracht, met een oppervlakte die ongeveer evenredig is met de geschatte warmtebehoefte.

De radiatoren zijn meestal in de buurt van ramen geplaatst om de daar aanwezige koude lucht direct te verwarmen, en zo het comfort te verbeteren. De cv wordt in veel gevallen geregeld door een huiskamerthermostaat die de ketel aan en uit laat gaan afhankelijk van de temperatuur in de huiskamer.

Wat is er verkeerd aan deze regeling?

- Als de huiskamerthermostaat ervoor zorgt dat de cv-ketel uit gaat, worden ook andere kamers niet verwarmd.
- De oppervlakte van de radiatoren is niet in elke kamer evenredig met de gewenste hoeveelheid warmte. Eventueel kan – door het instellen van de radiatorknoppen – de installatie uitgebalanceerd worden.
- Een aan/uit-regeling geeft een variatie van de temperatuur.  
Hoe is de regeling te verbeteren?
- Modulerende regeling (in plaats van aan en uit, wordt de cv-ketel harder en zachter gezet).
- Er bestaan optimaliserende regelingen, die na enkele dagen een instelling hebben gevonden waarbij met een zo hoog mogelijk rendement, binnen een redelijke tijd de juiste temperatuur wordt gehandhaafd. Een nadeel is dat de optimale instelling afhankelijk is van het weer. Bij sommige optimaliserende regelaars kan daarom ook een buitentemperatuurmeter worden aangesloten.
- Bij een lagere watertemperatuur heeft de ketel een hoger rendement. Er zijn daarom cv-installaties, waarbij de watertemperatuur automatisch wordt aangepast aan de buitentemperatuur.
- Meten en regelen van de verwarming per kamer, eventueel gecombineerd met aanwezigheidscontrole.

### Onderweg: de cruisecontrol

Op de snelweg wil je soms zo snel mogelijk rijden, zonder boven de maximumsnelheid te komen. De automobilist moet regelmatig op zijn snelheidsmeter kijken en meer of minder gas geven. Het comfort wordt verhoogd door een cruisecontrol. De gewenste snelheid wordt ingesteld, deze snelheid wordt continu vergeleken met de werkelijke snelheid waarna eventueel de brandstoftoevoer automatisch wordt aangepast. Sommige auto's hebben een regelsysteem wat automatisch gas terugneemt of afremt als de afstand tot de voorligger te klein is voor de snelheid.

### Op het werk: de chemische fabriek

In de procesindustrie wordt een groot deel van de investeringskosten besteed aan regeltechniek. Een chemisch proces werkt alleen goed bij een juiste waarde van druk, temperatuur en debiet (hoeveelheid product per seconde). Hoe beter de parameters geregeld worden, hoe hoger het rendement, hoe minder vervuiling ontstaat en hoe hoger de kwaliteit van het eindproduct.

Soms worden de procesomstandigheden bewust continu een beetje gevarieerd en wordt gemeten wat de beste resultaten oplevert om in de praktijk het proces steeds beter te optimaliseren.

### **In de bouw of haven: de hijskraan**

Bij de besturing van een hijskraan is het van belang dat versnellen en vertragen gecontroleerd plaatsvindt. Hoewel er snel gewerkt moet worden (denk maar aan het zo snel mogelijk lossen van een schip), moet de last altijd onder controle zijn. Schommelen van de last kan gevaarlijk zijn en zorgt voor tijdsvertraging. Er worden extra eisen gesteld aan de regeling, omdat de motor bij het ophijzen van de last een heel andere belasting heeft dan bij het laten vieren. Bovendien is de regeling afhankelijk van de last die aan de haak hangt. Als er een grote last naar beneden moet, zal de motor deze beweging afremmen om het vieren gecontroleerd te laten plaatsvinden, hierbij kan energie worden teruggegeven aan het netwerk (regeneratief bedrijf). Als er geen last aan de haak hangt, zal de motor ook bij het vieren een koppel moeten leveren om de wrijving van het aandrijfsysteem te overwinnen.

### **In de lucht: de Airbus A320**

De Airbus A320 was het eerste op grote schaal geproduceerde verkeersvliegtuig met een 'fly-by-wire'-besturing. Dat wil zeggen dat de besturing niet mechanisch is gekoppeld maar dat het stuursignaal door een computer wordt geïnterpreteerd en dat de computer vervolgens de stuuracties bepaalt. De software kan een stuuractie van de piloten negeren, wanneer het deze actie gevaarlijk vindt. Toen de A320 net uitkwam, zijn er een aantal vliegtuigen verongelukt. Sommigen noemden besturingsproblemen als oorzaak. Dit was echter niet de officiële oorzaak. In principe geeft een goed fly-by-wire-systeem, door de controle op ongewenste besturingsacties, juist extra veiligheid.

Moderne gevechtsvliegtuigen zijn zonder fly-by-wire zelfs niet meer te besturen. De vliegtuigen zijn uit zichzelf niet stabiel en moeten voortdurend bijgestuurd worden om niet neer te storten.

## 1.4 Opdrachten

1.
  - a. Omschrijf de werking van de besturing voor de snelheid voor een auto.
  - b. Omschrijf de werking van de snelheidsregeling voor dezelfde auto.
  - c. Geef voordelen van regelen boven besturen voor deze situatie.
  - d. Geef aan waarom een regeling in deze situatie ook niet optimaal is.
2. Als vraag 1, maar dan toegepast op een verwarmingssysteem.
3.
  - a. Geef een omschrijving van twee meet- en regelprocessen.
  - b. Geef nadelen en mogelijke verbeteringen voor deze systemen.



# Hoofdstuk 2

## Modelvorming

### Leerdoelen

Na bestudering van dit hoofdstuk en het uitvoeren van de opdrachten kan de student:

- de begrippen overdrachtsfunctie, proportioneel, integrator en differentiator uitleggen;
- een model maken van een systeem gebaseerd op gegeven formules;
- een model opbouwen door het koppelen van subsystemen;
- de overdrachtsfunctie bepalen van een systeem dat bestaat uit subsystemen met bekende overdrachtsfuncties, die parallel, serieel of met terugkoppeling verbonden zijn;
- een differentiaalvergelijking omzetten in  $s$ -notatie (Laplace-transformatie) en dit schrijven als een overdrachtsfunctie.

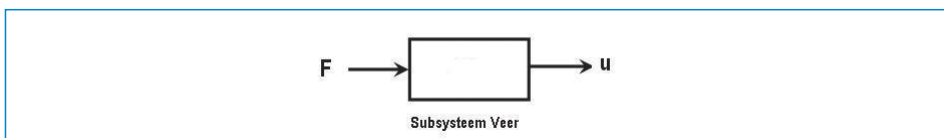
In de regeltechniek is het gedrag van het te regelen systeem van belang. Het gedrag wordt gekenmerkt door het verband tussen de in- en uitgangssignalen. De regelaar zal dusdanige ingangssignalen moeten geven dat de gewenste uitgangssignalen ontstaan.

Het te regelen systeem kan ingewikkeld zijn. Voor de bestudering van het gedrag is het vaak beter dit systeem op te delen in een aantal eenvoudiger subsystemen.

### 2.1 Substelsysteem en overdrachtsfunctie

Een voorbeeld van een eenvoudig (sub)systeem is een veer. De inwerking ( $u$ ) kan worden gezien als een resultaat van de kracht ( $F$ ) die op de veer wordt uitgeoefend.

*Een subsysteem kan worden weergegeven in een blokschema, waarbij de in- en uitgaande signalen worden aangegeven. De pijlen geven de richting van het signaal aan.*



**Figuur 2-1** Het subsysteem 'veer' met een kracht  $F$  als ingangssignaal en de uitwijking  $u$  als uitgangssignaal.

Het ingangssignaal is hier dus de kracht  $F$  en het uitgangssignaal de verplaatsing  $u$ .

Indien de veer lineair is, dat wil zeggen het uitgangssignaal is evenredig met het ingangssignaal, is de formule van de veer.  $F = k \cdot u$ .

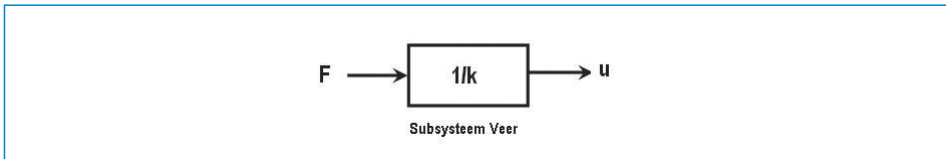
### Wat is lineariteit?

Een systeem is lineair als het superpositieverschijnsel geldt, dat wil zeggen:

Wanneer een ingangssignaal (oorzaak)  $u$  leidt tot een uitgangssignaal (gevolg)  $U$  en een ingangssignaal  $v$  leidt tot een uitgangssignaal  $V$ , dan leidt een ingangssignaal  $u + v$  tot een uitgangssignaal  $U + V$ .

De verhouding uitgangssignaal/ingangssignaal (dit wordt de overdrachtsfunctie of overbrengingsverhouding genoemd) is dan:

$$\frac{u}{F} = \frac{1}{k}$$

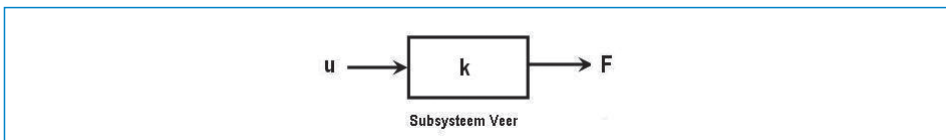


**Figuur 2-2** Het subsysteem van een veer met een kracht  $F$  als ingangssignaal en de uitwijking  $u$  als uitgangssignaal. De overdrachtsfunctie is  $1/k$  (waarbij  $k$  de veerconstante is).

Let op: voor een andere toepassing kan de verplaatsing opgedrongen worden en is de kracht het uitgangssignaal van het systeem (het resultaat van de verplaatsing).

De overdrachtsfunctie van dezelfde veer is in dit geval:

$$\frac{F}{u} = k$$



**Figuur 2-3** Het subsysteem van een veer met een uitwijking  $u$  als ingangssignaal en de kracht  $F$  als uitgangssignaal. De overdrachtsfunctie is  $k$  (waarbij  $k$  de veerconstante is).

Voor beide overdrachtsfuncties geldt dat het uitgangssignaal evenredig is met het ingangssignaal (proportioneel).

- De formule die de verhouding tussen het uitgangssignaal en het ingangssignaal van een (sub)systeem geeft, heet de overdrachtsfunctie van dat (sub)systeem.
- Eenzelfde systeem kan meerdere overdrachtsfuncties hebben, afhankelijk van welk signaal als ingangssignaal en als uitgangssignaal is gekozen.



- Wanneer uitgangssignaal/ingangssignaal (de overdrachtsfunctie) een constante is, spreekt men van een proportioneel systeem.

Er zijn ook systemen waarvan de momentane waarde van het uitgangssignaal niet alleen afhankelijk is van de momentane waarde van het ingangssignaal maar ook van wat er daarvoor gebeurd is.

Bij een demper is de benodigde kracht evenredig met de snelheid van indrukking, immers:  
 $F = c \cdot v$

De overdrachtsfunctie  $F/v = c$ , dus deze overdrachtsfunctie is proportioneel.

De overdrachtsfunctie  $v/F = 1/c$ . Ook  $1/c$  is een constante, dus ook deze overdrachtsfunctie is proportioneel.

Als het ingangssignaal van de demper een kracht is en het uitgangssignaal de indrukking, is het uitgangssignaal niet alleen afhankelijk van het ingangssignaal, maar ook van de tijd, omdat:

$$v = \frac{du}{dt} \Rightarrow$$

$$F = c \cdot v = c \cdot \frac{du}{dt}$$

$$\frac{v}{F} = \frac{du/dt}{F} = \frac{1}{c} \Rightarrow du = \frac{F}{c} \cdot dt$$

$$u = \int \left( \frac{F}{c} \right) \cdot dt = \left( \frac{1}{c} \right) \int F \cdot dt$$

De indrukking van de zuigerstang van de demper is  $1/c$  maal de integraal van de kracht op de zuigerstang. Wanneer het gaat om de verplaatsing als functie van de kracht ( $u/F$ ), is de demper een integrerend systeem, ofwel de demper gedraagt zich hier als een integrator.

Als  $F$  constant is geldt:

$$u = \left( \frac{F}{c} \right) \int dt = \left( \frac{F}{c} \right) \cdot t + u_0$$

Ofwel, als de kracht constant is, wordt de indrukking evenredig met de tijd groter (totdat de maximale indrukking van de demper is bereikt).

Let op: dit wil niet zeggen dat een demper een integrator is. Eerder bleek immers dat de overdrachtsfunctie  $v/F$  van dezelfde demper proportioneel is. De overdrachtsfunctie hangt dus af van wat we in een bepaalde situatie als ingangssignaal en wat als uitgangssignaal zien.

Als de kracht als uitgangssignaal wordt gezien en de indrukking als ingangssignaal, dan geldt:

$$F(t) = c \cdot \left( \frac{du(t)}{dt} \right)$$

Dus wanneer gekeken wordt naar de kracht, die ontstaat ten gevolge van een verplaatsing ( $F / u$ ), is de demper een differentiator.

In de regeltechniek wordt veel gebruikgemaakt van Laplace-transformatie. Hierbij wordt de term  $d / dt$  uit een differentiaalvergelijking vervangen door de term 's' en functies die afhankelijk zijn van de tijd worden afhankelijk van  $s$ . Men spreekt ook wel van functies in het tijdsdomein, die worden omgezet naar functies in het  $s$ -domein.

$$v(t) = \frac{du(t)}{dt}$$

wordt bij Laplace-transformatie vervangen door  $V(s) = s \cdot U(s)$ , voor het gemak geschreven als:

$$V = s \cdot U$$

Na Laplace-transformatie kan de functie eventueel met de 'normale' rekenregels vereenvoudigd of herschreven worden.

Omdat geldt:

$$v(t) = \frac{F(t)}{c}$$

en na Laplace-transformatie  $V(s) = s \cdot U(s)$ , geldt:

$$s \cdot U(s) = \frac{F(s)}{c}$$

De overdrachtsfunctie  $u / F$  is dus te schrijven als:

$$\frac{U}{F} = \frac{1}{c \cdot s}$$

Vergelijking 1

Meer informatie over Laplace-transformatie staat in bijlage 4.

## 2.2 Overdrachtsfuncties van elektrotechnische componenten

Wanneer het spanningsverschil wordt gezien als gevolg (uitgangssignaal) van de stroom die door het component gaat (ingangssignaal) is op dezelfde manier de overdrachtsfunctie voor elektrische componenten af te leiden.

Voor een weerstand:

$$U = I \cdot R \text{ (Wet van Ohm), dus } U / I = R$$