

HET REGELEN VAN TEMPERATUUR

TIJDENS ELEKTROLYTISCH VERCHROMEN



Remco Vink
Tata Steel IJmuiden
De Haagse Hogeschool
donderdag 28 augustus 2014

Het regelen van temperatuur

Tijdens elektrolytisch verchromen

Auteur: Remco Vink
Bedrijf: Tata Steel IJmuiden
School: De Haagse Hogeschool
Datum: donderdag 28 augustus 2014

Voorwoord

Dit verslag is geschreven in het kader van mijn afstuderen voor de opleiding HBO Elektrotechniek aan De Haagse Hogeschool. Tijdens mijn afstuderen is een project uitgevoerd op regeltechnisch gebied en is bedoeld voor De Haagse Hogeschool en belanghebbenden binnen Tata Steel IJmuiden. Omdat het verslag op regeltechnisch gebied is en gebruik gemaakt is van de software MATLAB Simulink maakt enige kennis hiervan het verslag beter te begrijpen.

Deze afstudeerstage is uitgevoerd gedurende februari 2014 tot en met augustus 2014 voor Tata Steel IJmuiden. Mijn dank gaat uit naar de opdrachtgever Reinier Lugt (HoCo-RST), mijn begeleider Richard Kleijne en de afdeling Project Management & Support (PMS). Tijdens het afstuderen ben ik goed begeleid en heb ik veel geleerd. Bovendien heb ik veel vrijheid gekregen om zelf richting te geven aan het project.

Inhoudsopgave

VOORWOORD	2
INHOUDSOPGAVE.....	3
1. SAMENVATTING.....	4
2. ACHTERGRONDEN	5
3. PROBLEEMOMSCHRIJVING	6
4. ONDERZOEK.....	7
4.1 PROCESONDERZOEK VERCHROMEN	7
4.2 ONDERZOEK NAAR THERMISCHE MASSA	8
4.3 ONDERZOEK NAAR INVLOEDEN OP DE TEMPERATUUR.....	11
5. MODEL	20
5.1 OPBOUW VAN HET MODEL.....	20
5.1.1 <i>Systeem</i>	20
5.1.2 <i>Huidige regeling</i>	21
5.2 VALIDATIE VAN HET MODEL	22
6. ONTWERPEN VAN EEN REGELING	26
6.1 EISEN EN PROBLEMEN	26
6.2 SPLIT RANGE	28
6.3 REGELEN VAN DE VERWARMING	29
6.3.1 <i>Praktijk ontwerp</i>	29
6.3.2 <i>Instellen regelaar volgens klassieke ontwerp formules</i>	32
6.3.3 <i>Ontwerpen met een pn-beeld</i>	36
6.3.4 <i>Vergelijking gevonden instellingen</i>	38
6.4 REGELEN VAN DE KOELING	40
6.5 FEED FORWARD	40
7. MODELLEREN NIEUWE REGELING IN MATLAB SIMULINK.....	41
8. RESULTAAT	43
9. AANBEVELINGEN	45
10. LITERATUURLIJST.....	46
BIJLAGE 1: MODELBESCHRIJVING IN DETAIL.....	47
1.1 NIET BEÏNVLOEDBAAR	47
1.2 HUIDIGE REGELING	53
1.3 NIEUWE REGELING	55
BIJLAGE 2: SIEMENS S7 PID DOCUMENTATIE	58
BIJLAGE 3: SOFTWARE HUIDIGE REGELING.....	67

1. Samenvatting

Het project is uitgevoerd op de afdeling Project Management & Support (PMS) van Tata Steel Packaging (TSP) IJmuiden. Op de afdeling TSP wordt blik geproduceerd, tijdens het produceren van blik wordt staal gewalst tot de gewenste dikte. De walsen die hierbij gebruikt worden zijn verchroomd zodat deze niet snel slijten en de ruwheid langer vasthouden. Bij het verchromen is de temperatuur waarbij dit gebeurt van groot belang, echter komt door het elektrolytisch verchromen veel warmte vrij. Om de temperatuur te regelen wordt gebruik gemaakt van een digitale regeling voor de verwarming en koeling, deze moet zorgen dat de temperatuur tussen de 53 °C en 55 °C blijft.

Om de invloeden op de temperatuur in kaart te brengen wordt onderzoek gedaan naar de omgevingsverliezen, verschillende processtappen en de koel- en verwarmvoorziening. Ook wordt de huidige regeling onderzocht en opgebouwd in MATLAB Simulink.

Na het modelleren van de installatie met de bestaande regeling wordt gekeken of het model valide is, dit wordt gedaan m.b.v. data logging.

Nadat het model gevalideerd is kan een nieuwe regeling ontworpen worden. Deze regeling wordt ontworpen aan de hand van opgestelde eisen en de problemen die hieruit voortkomen. Bij de problemen wordt gezocht naar een passende regeltechnische oplossing. Zo wordt een regeling ontworpen voor de verwarming en koeling.

Het ontwerpen van de regeling van de verwarming gebeurt op drie verschillende manieren, namelijk: praktijk ontwerp, via klassieke ontwerp formules en via ontwerpen met een pn beeld. Na het vergelijken van de verschillende methodes is een optimale instelling gevonden met het ontwerpen met een pn beeld. De gevonden instelling voor het regelen van het verwarmen is: een gain van **74** en een integratietijd van **2500s**.

Bij het regelen van het koelen hoeft geen rekening gehouden te worden met stabiliteit. De periodes waarbij warmte ingebracht worden zijn namelijk vaak korter dan de dode tijd van het systeem. Bovendien is er in veel gevallen te weinig koelvermogen beschikbaar om overschot te voorkomen. Er is hierdoor ook geen statische fout die tijdens het koelen weg gewerkt moet worden. De koeling wordt met deze gedachte proportioneel geregeld met een gain van **200**.

De regeling kan verder geoptimaliseerd worden als er Feed Forward toegepast wordt, deze kan namelijk voorsturing geven op verwachte storing, in dit geval het vermogen dat benodigd is voor het verchromen. Door de grote dode tijd in het systeem wordt verwacht dat dit een aanzienlijke verbetering oplevert.

Aan de hand van het gevalideerde model is het uiteindelijke resultaat dat de tijd waarin de temperatuur van het bad buiten de gewenste temperatuurlimieten is geweest, bijna vijf keer minder. Ook wijken de minimale en maximale temperaturen minder af van de gewenste temperatuur. Door deze betere temperatuur zal de kwaliteit van de chroomlaag toenemen en de standtijd van de walsen langer worden.

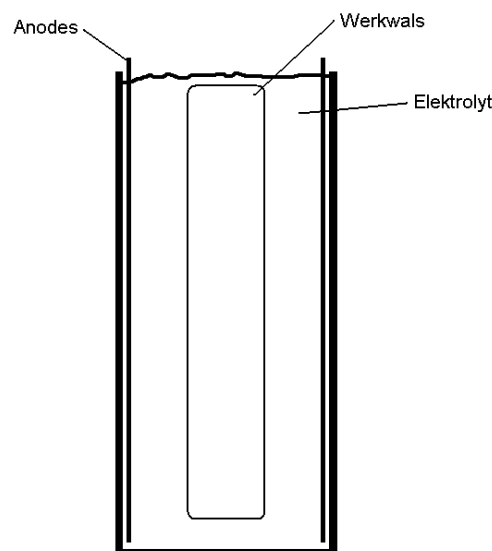
2. Achtergronden

Het project is uitgevoerd op de afdeling Project Management & Support van Tata Steel Packaging (TSP) IJmuiden.

Op de afdeling TSP wordt blik geproduceerd, tijdens het produceren van blik wordt het dikkere staal gewalst tot de gewenste dikte. Het walsen van dit staal gebeurt met een combinatie van steun- en werkwals. Hierbij komt de werkwals in contact met het staal en de steunwals is ter ondersteuning van de werkwals. De werkwalsen worden verchroomd met hardchromium zodat de walsen niet snel slijten en de ruwheid langer vasthouden. Door de enorme krachten op deze laag hardchromium zijn de kwaliteitseisen hieraan hoog.

Bij TSP wordt het onderhoud van de walsen uitgevoerd door HoCo-RST (Hoogovens Court Holding - Roll Service Technology). HoCo-RST is een joint venture van Tata en Court Holding, deze beschikt hiervoor over een eigen werkplaats (slijperij, ruwbank, schoonmaaksectie, en verchrominstallatie).

Na het schoonmaken, opnieuw slijpen en opruwen van een wals wordt deze verchroomd. Bij het verchromproces wordt de wals ondergedompeld in een chroomhoudend elektrolyt (18m³) en wordt d.m.v. elektrolyse ($I \approx 5000-12000A$) een nieuwe chroomlaag aangebracht op de wals.



Figuur 1: schematische tekening verchromen

Tijdens dit verchromen is de temperatuur van groot belang voor de kwaliteit van de chroomlaag. Echter komt door de elektrolyse ook veel warmte vrij, deze warmte moet weer weg gekoeld worden zodat de temperatuur binnen de grenzen (53-55 °C) blijft.

3. Probleemomschrijving

Voordat aan het project begonnen kan worden moet eerst duidelijk zijn wat het probleem is en waar de oorzaak ligt. Bij het verchromen kunnen ophopingen of scheuren ontstaan in de chroomlaag. Hierdoor zal de chroomlaag sneller slijten en dus minder standtijd hebben.

De oorzaak voor deze ophopingen en scheuren is de wisselende temperatuur. De temperatuur van het elektrolyt wordt namelijk te hoog en te laag. Wat ook opvalt is dat de temperatuur zonder dat er geproduceerd wordt niet stabiel is maar oscilleert, dit is uiteraard niet gewenst.

4. Onderzoek

Voor een juiste modelvorming is het van belang dat er eerst onderzoek verricht wordt naar de aanwezige parameters die invloed hebben op de temperatuur. Bovendien is het van belang om het principe van verchromen te begrijpen. Dit wordt aan de hand van kleinschalige onderzoeken gedaan.

Bij elk onderzoek worden van tevoren onderzoeksvragen vastgesteld, deze vragen richten zich op belangen voor het project en zorgen ervoor dat er niet teveel afgeweken wordt van het hoofdonderwerp.

4.1 Procesonderzoek verchromen

Voor het project is enige basiskennis van het verchromen benodigd. Dit onderzoek richt zich hierop. Tijdens dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van bronnen te vinden op internet en intern aanwezige informatie.

Onderzoeksvragen

1. Wat is elektrolyse/galvaniseren?
2. Wat is de invloed van de temperatuur op de chroomlaag?
3. Welke processtappen vinden plaats om een wals te verchromen?

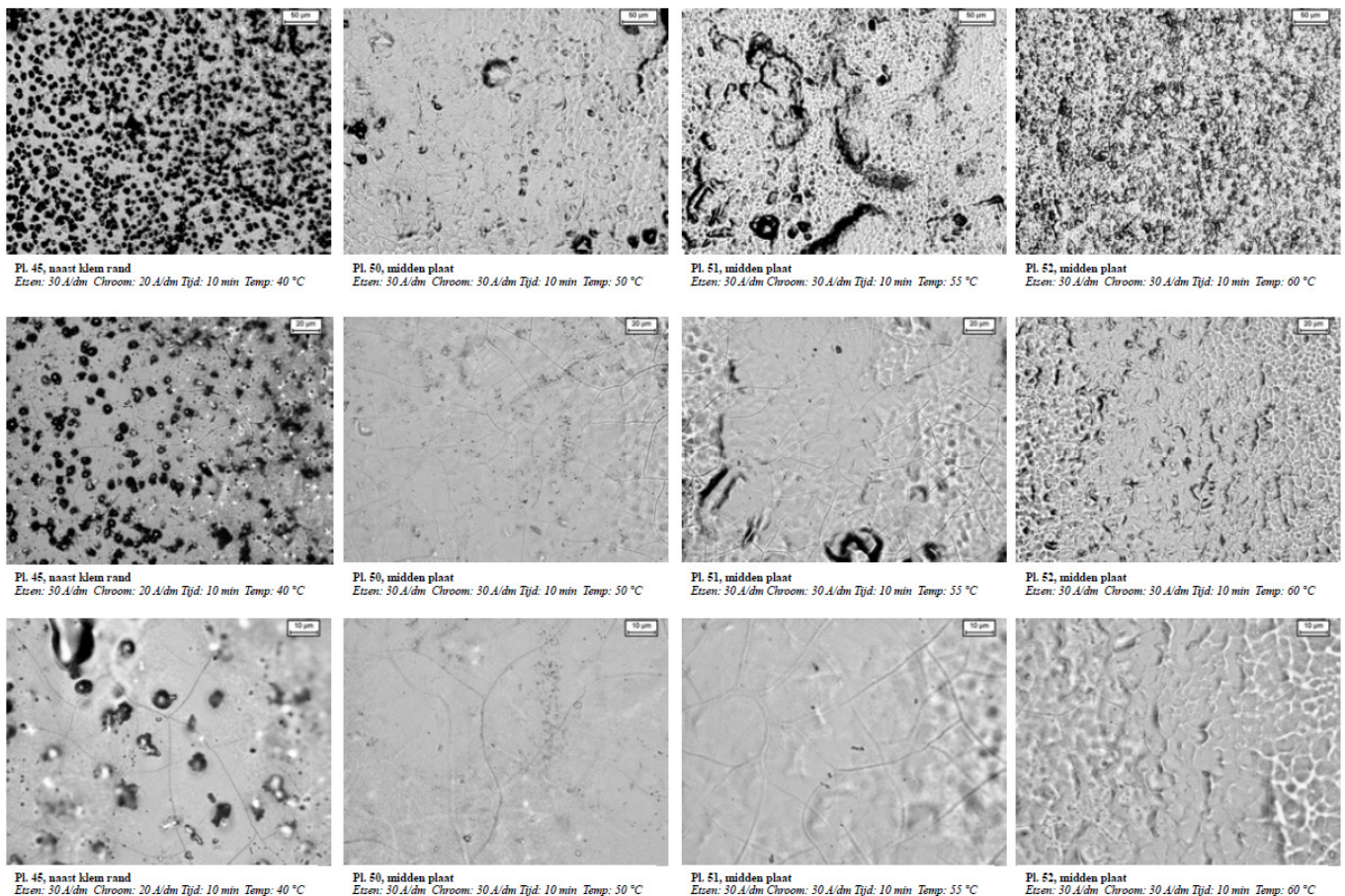
Wat is elektrolyse/galvaniseren?

Elektrolyse is een chemische reactie waarbij onder invloed van een elektrische stroom samengestelde stoffen worden ontleed tot enkelvoudige stoffen en/of andere samengestelde stoffen. Het te ontleden materiaal wordt, indien het nog niet vloeibaar was, opgelost of gesmolten zodat de ionen vrij kunnen bewegen. In de vloeistof worden twee elektroden gedompeld: de kathode en de anode. Tussen deze elektroden wordt een elektrische spanning aangebracht. Hierdoor zullen positief geladen deeltjes (kationen) naar de kathode bewegen en negatief geladen deeltjes (anionen) naar de anode (*“Elektrolyse”, maart 2014*).

Galvaniseren is een methode die gebruikmaakt van elektriciteit om een voorwerp te bedekken met een laagje metaal. Door een metalen werkstuk van een deklaag van een ander metaal te voorzien, kan men profiteren van de eigenschappen van beide metalen. Er wordt gebruik gemaakt van een externe stroombron. Bij deze vorm van galvanisatie wordt het voorwerp in een zoutoplossing ondergedompeld (met het metaal als ion in het zout), waardoorheen via een externe bron een stroom wordt geleid, waarbij het voorwerp (werkwals) als kathode wordt gebruikt. Er treedt dan een redoxreactie op. Omdat de werkwals als kathode fungeert zullen de positief geladen chroomionen, naargelang hun valentie, elk één of meer van de door de stroombron aangeboden elektronen opnemen en slaat het metaal neer op de werkwals (*“Galvaniseren”, januari 2014*).

Wat is de invloed van de temperatuur op de chroomlaag?

Tijdens het walsen worden enorme krachten gebruikt, de chroomlaag moet in staat zijn deze krachten te doorstaan, zonder dat er veel slijtage is. Voor een goede kwaliteit hardchroom is temperatuur van belang. Bij een te grote afwijking van de temperatuur kunnen er ophopingen of relatief grote scheuren in de chroomlaag ontstaan. Dit heeft als gevolg dat de chroomlaag sneller slijt en de levensduur dus korter is.



vrijdag 11 februari 2011(w)

Figuur 2: effect van temperatuur op chroomlaag

Welke processtappen vinden plaats om een wals te verchromen?

Voordat het verchromen begint wordt een wals eerst schoon gemaakt en gereinigd, dit gebeurt in een vloeistof van circa 70 °C. Eventueel wordt de wals in een buffer tank gehangen, deze is ook 70 °C. Deze stappen zorgen ervoor dat de wals opgewarmd wordt. De tijd dat de wals zich in deze tanks bevindt zijn echter niet altijd hetzelfde. Er zijn richtlijnen voor deze tijden maar het hangt sterk af van de operators hoe deze richtlijnen worden nageleefd. Na het reinigen van de wals kan verchromd worden. De wals wordt in de tank met een inhoud van 18m³ gehangen. Hierna begint het verchromen, waarbij afhankelijk van de wals, voor bepaalde tijd een bepaalde stroom zal gaan lopen. De tijdsduur en stroom wordt bepaald aan de hand van een preset model.

4.2 Onderzoek naar thermische massa

Het elektrolyt en de walsen worden aanschouwd als een thermische massa, dit onderzoek richt zich hierop. Het onderzoek wordt beperkt tot de onderzoeksvragen.

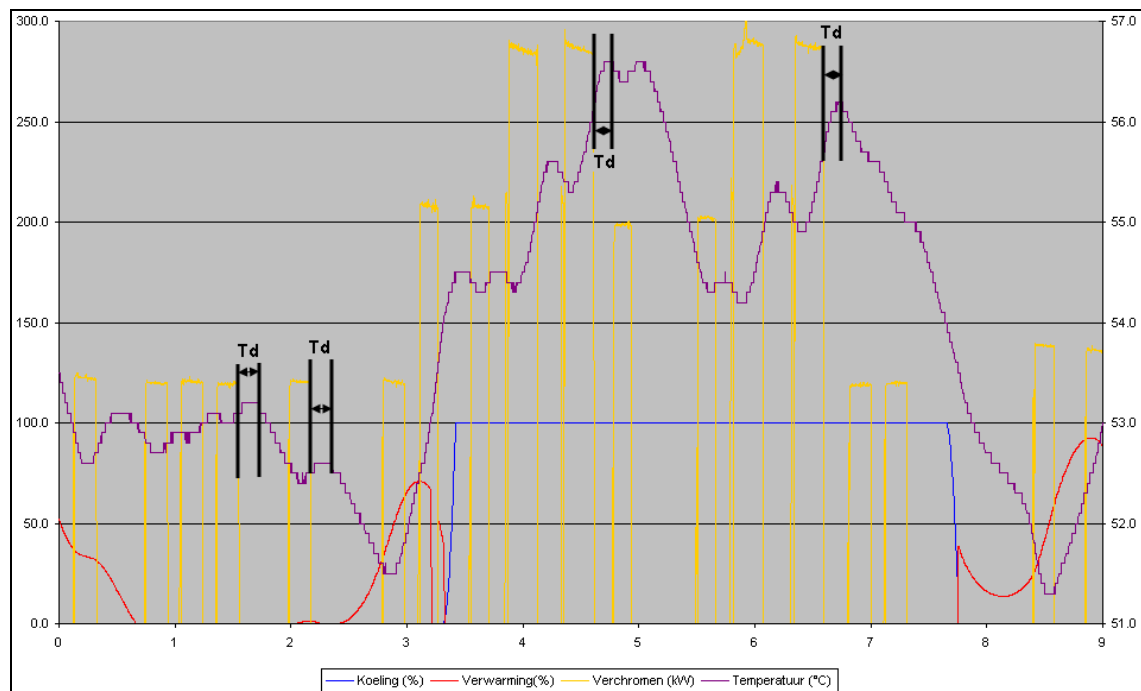
Onderzoeksvragen

1. Wat is een thermische massa?
2. Welke formules zijn van toepassing?

Wat is een thermische massa?

De thermische massa of warmtecapaciteit is het vermogen van materie om warmte op te nemen en vast te houden. Het is de hoeveelheid energie (in Joule) die nodig is om de temperatuur van een kilogram materie één graad te doen stijgen. In dit geval is het elektrolyt (en de wals) dus de thermische massa. De warmtecapaciteit hiervan is de energie benodigd om het chroombad één graad te doen stijgen of dalen (*“Wat is de thermische massa?”*, maart 2014).

Door slechte roering is de temperatuur van een thermische massa in dit geval niet homogeen. Hierdoor worden variaties van de temperatuur niet direct gemeten. Er zit een tijdsvertraging tussen het beïnvloeden en meten van de temperatuur. Deze wordt de dode tijd genoemd. Uit data logging is de dode tijd bepaald door te kijken wanneer de temperatuur daalt na het stoppen van verchromen (aangegeven met pijl):



Figuur 3: data logging voor het bepalen van de dode tijd

$$\tau_d = 600[s]$$

Welke formules zijn van toepassing?

Om de benodigde energie voor een verandering in de temperatuur te berekenen is er de volgende formule:

$$Q = Q_{th} \cdot \Delta T [J] \quad (1)$$

Q = energie benodigd voor temperatuur verandering $[J]$

Q_{th} = warmte capaciteit van de materie $[J/(kg * K)]$

ΔT = temperatuurverandering van het elektrolyt $[^{\circ}C]$

Om deze energie om te zetten in een vermogen:

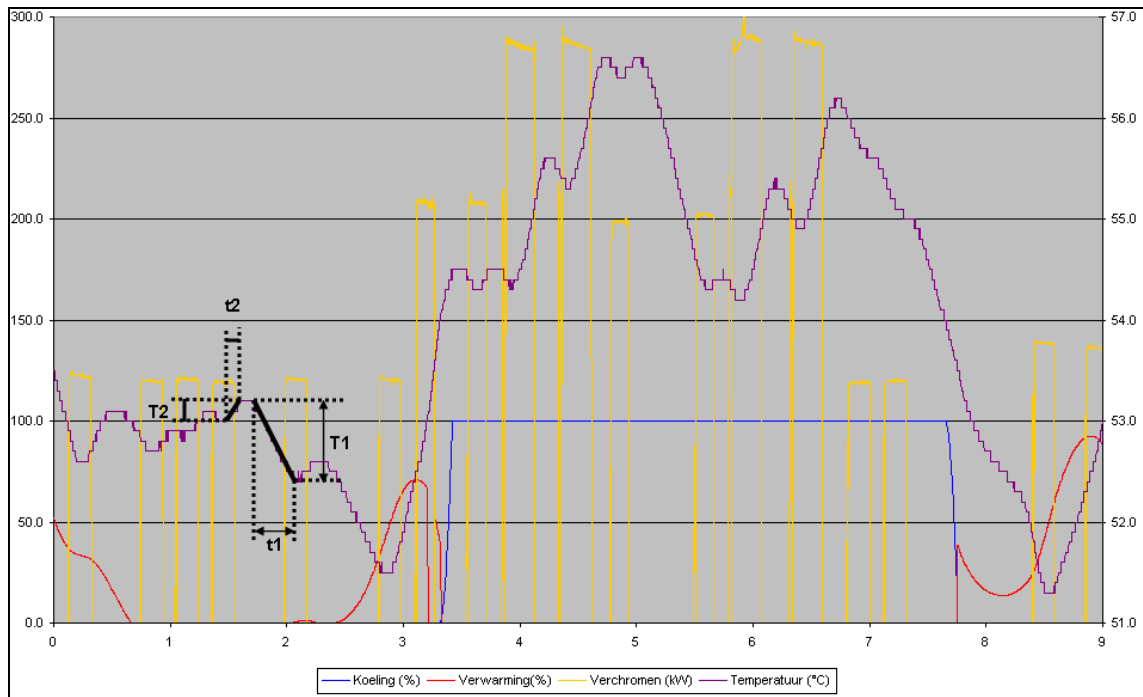
$$P = \frac{Q_{th} \cdot \Delta T}{t} = \frac{Q}{t} [W] \quad (2)$$

P = thermisch vermogen [W]

t = tijd waarover de temperatuurverandering heeft plaatsgevonden [s]

(Kimmenaede, 2001).

Om in dit geval de warmtecapaciteit van het elektrolyt te bepalen wordt terug gerekend vanuit data logging. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de warmte die vrijkomt bij elektrolyse, dit wordt toegelicht in hoofdstuk 4.3.



Figuur 4: data logging voor het berekenen van verwarmingsvermogen

Uit deze afbeelding kunnen twee vergelijkingen opgesteld worden, hierbij is één onbekende, namelijk de warmtecapaciteit van het elektrolyt. Na het oplossen van deze vergelijkingen kan deze verkregen worden:

$$P_{vl} = \frac{Q_e \cdot \Delta T_1}{t_1} = \frac{Q_e \cdot 0.8}{1220} = 6.56 \cdot 10^{-4} Q_e$$

$$P_e \cdot \eta_w - P_{vl} = \frac{Q_e \cdot \Delta T_2}{t_2}$$

$$120 \cdot 0.85 - 6.56 \cdot 10^{-4} Q_e = \frac{Q_e \cdot 0.2}{300} \Rightarrow Q_e = 75600 [kJ / ^\circ C]$$

P_{vl} = omgevingsverlies [kW]

Q_e = warmtecapaciteit elektrolyt [kJ / °C]

ΔT_n = temperatuurverschil [°C]

t_n = tijd [s]

P_e = vermogen voor elektrolyse [kW]

η_w = gedeelte van vermogen voor elektrolyse wat omgezet wordt in warmte

4.3 Onderzoek naar invloeden op de temperatuur

Er moet een energiebalans van het proces opgesteld worden, deze energiebalans is gericht op de temperatuur van het chroombad. Elke invloed op de temperatuur van het chroombad moet in eerste instantie meegenomen worden. Aan het einde van dit onderzoek moeten de parameters, en de omvang hiervan, voor het opstellen van een energiebalans bekend zijn.

Onderzoeksvragen

1. Welke invloeden zijn er op de temperatuur van het chroombad?
2. Zijn deze invloeden variabel en kunnen ze geregeld worden?
3. Wat is de omvang van deze invloeden?

Welke invloeden zijn er op de temperatuur van het chroombad?

Er zijn altijd invloeden op de temperatuur van het chroombad, met en zonder productie. Om tot een juist model te komen moeten minstens de grote invloeden en de omvang hiervan onderzocht worden.

Omgeving. De omgeving heeft altijd invloed op de temperatuur, afhankelijk van de omgevingstemperatuur en de badtemperatuur varieert dit.

Proces(stappen). Tijdens het proces worden hoge stromen gebruikt, hierdoor ontstaat veel warmte. Ook moet er rekening gehouden worden met de verschillende processtappen die genomen worden (bijv. wals inzetten en wals uithalen).

Warmtewisselaars. Voor zowel het verwarmen als koelen van het chroombad zijn er warmtewisselaars geïnstalleerd, de eigenschappen hiervan zijn van belang.

Zijn deze invloeden variabel en kunnen ze geregeld worden?

Voor de juistheid van het model moet het variëren van de invloeden ook meegenomen worden.

Omgeving, de omgeving is een variabele invloed op de temperatuur (dag/nacht, zomer/winter). De omgevingstemperatuur kan in theorie geregeld worden, voor dit project wordt dit echter niet reëel geacht.

Proces(stappen), de stroom die nodig is om een wals te verchromen varieert, voor kleinere walsen is deze lager dan bij grote walsen. Bij het begin van het proces wordt de werkwals in het chroombad gehangen. Deze werkwals heeft ook, afhankelijk van de voorbehandeling, een bepaalde thermische energie. Deze thermische energie heeft invloed op het temperatuurverloop van het chroombad.

Warmtewisselaars, tijdens dit project wordt geen rekening gehouden met extra vervuiling in de tijd. Er wordt een maximaal vermogen berekend waar in de loop van het project mee gewerkt wordt.

Wat is de omvang van deze invloeden?

De energiebalans is een opsomming van de invloeden op de temperatuur, om tot een energiebalans te komen worden de invloeden theoretisch benaderd en waar mogelijk onderbouwd met formules.

Omgeving

De warmteverliezen van het chroombad aan de omgeving zijn in twee categorieën in te delen. Ten eerste is er warmteverlies door het direct contact tussen het elektrolyt en de lucht. Ten tweede is er nog warmteverlies door het temperatuurverschil tussen grond en chroombad, hier zit echter een laag isolatie tussen.

Luchtverliezen

Het warmteverlies van het elektrolyt aan de lucht vindt plaats aan de bovenkant van het chroombad, dit is in direct contact met de lucht. Deze soort van warmte overdracht wordt convection genoemd. De verliezen van chroombad aan lucht is als volgt, volgens Newton's Law of Cooling, te schrijven ("*Convective Heat Transfer*", april 2014):

$$q = h_c \cdot A \cdot dT [W] \quad (3)$$

hierin

$$h_c = 10.45 - v + 10v^{0.5} [W/(m^2 K)] \quad (4)$$

q = warmte overdracht per tijdseenheid $[W]$

h_c = convectie warmte overdrachtscoëfficiënt $[W/(m^2 K)]$

A = warmte overdracht oppervlakte $[m^2]$

dT = temperatuur verschil vloeistof en lucht $[^\circ C]$

v = relatieve luchtsnelheid $[m/s]$

De gegevens worden hieronder getoond, waarmee de warmte overdracht berekend wordt.

$A [m^2]$	$dT [^\circ C]$	$v [m/s]$	$h_c [W/(m^2 K)]$	$q [W]$
4.53	34	2	22.59	3479

Tabel 1: Luchtverliezen

Energieverliezen door tankwanden en bodem

De tank staat in een grote sleuf in de betonnen vloer. In deze sleuf staan ook de schoonmaaktank, reinigingstank en de buffertank. De temperatuur van de lucht in deze sleuf is niet gelijk aan de omgevingstemperatuur. De lucht in deze sleuf staat redelijk stil waardoor het opwarmt. Werkelijke temperatuur is niet bekend maar er wordt aan de hand van de omgevingsverliezen een schatting gemaakt.

Het warmteverlies van het chroombad naar de grond moet op een andere manier bepaald worden. Het gaat hier om verliezen die plaatsvinden door meerdere lagen materiaal, om deze verliezen te berekenen wordt de hierop volgende formule gebruikt: ("*Conductive Heat Transfer*", april 2014):

$$q = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{S_1}{k_1 \cdot A} + \frac{S_2}{k_2 \cdot A} + \dots + \frac{S_n}{k_n \cdot A}} \quad (5)$$

q = warmte overdracht per tijdseenheid [W]

T_1 = temperatuur van het bad [°C]

T_2 = temperatuur van de lucht [°C]

S_n = dikte van materiaal n [m]

k_n = thermische geleidbaarheid van materiaal n [W / mk]

A = oppervlakte van de wand [m²]

De wand van de tank en de bodem van de tank hebben niet dezelfde isolatie laag. De bodem is namelijk voorzien van 10mm isolatie, waar de wand voorzien is van 3mm isolatie. Om dit mee te nemen worden de verliezen door de wand en de verliezen door de bodem apart berekend en vervolgens opgeteld ("Thermal Conductivity of some common Materials and Gases", april 2014).

	T_1 [°C]	T_2 [°C]	S_1 [m]	S_2 [m]	k_1 [W / mk]	k_2 [W / mk]	A [m ²]	q [W]
Wand	54	35	0.008	0.003	55	0.19	40.47	48260
Bodem	54	35	0.008	0.01	55	0.19	4.51	1624

Tabel 2: Verliezen door tankwanden en bodem

De totale omgevingsverliezen kunnen nu berekend worden:

Verliezen door wand [W]	Verliezen door bodem [W]	Luchtverliezen [W]	Totale verliezen [W]
48260	1624	3479	53363

Omdat de verliezen veel variëren wordt voor het gemak verder gerekend met een **totaal verlies van 50kW**.

Proces(stappen)

Tijdens het proces wordt er elektrolyse gebruikt om chroomionen op de werkwals neer te slaan. Voor elektrolyse zijn hoge stromen vereist, een gedeelte van deze stroom wordt door de elektrische weerstand van het elektrolyt omgezet in warmte. De stroom varieert sterk gedurende het proces, de warmte ontwikkeling dus ook. De warmte ontwikkeling in het elektrolyt kan als volgt geschreven worden:

$$P_w = I^2 \cdot R_e [W] \quad (6)$$

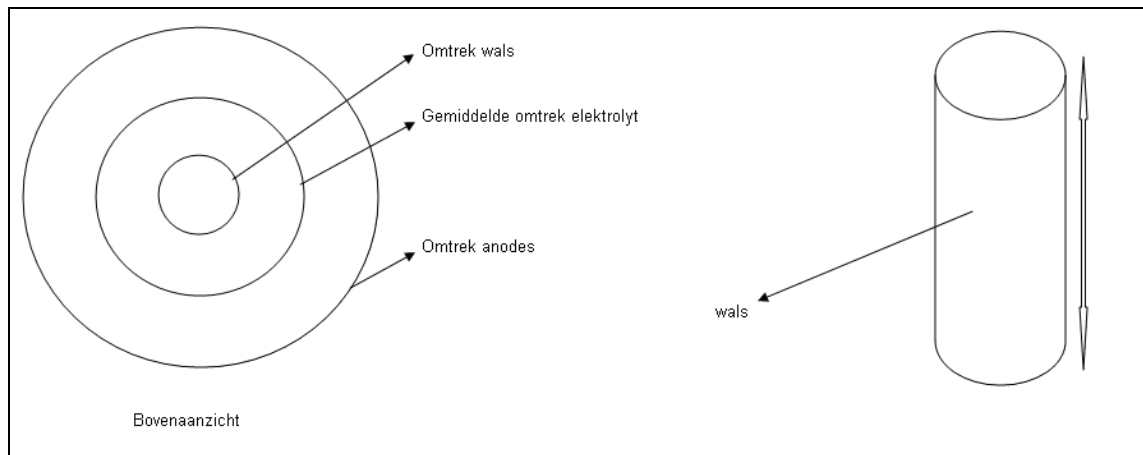
P_w = vermogen wat in warmte wordt omgezet [W]

I = stroom proces [A]

R_e = elektrische weerstand elektrolyt [Ω]

De elektrische weerstand van anode naar kathode is niet bekend. Om deze weerstand te berekenen wordt de gemiddelde afstand van anodes naar wals en de gemiddelde

lengte van de wals genomen. Met deze gegevens kan aan de hand van de geleiding van het elektrolyt (gehaald uit een rapport aanwezig bij HoCo-RST) de weerstand berekend worden. Vervolgens wordt deze weerstand gebruikt om de warmteontwikkeling te berekenen.



Figuur 5: parameters voor het berekenen van elektrische weerstand elektrolyt

Soortelijke geleidbaarheid [S / m]	Omtrek wals [m]	Omtrek Elektrolyt [m]	Omtrek Anodes [m]	Lengte wals [m]	Elektrische geleidbaarheid [S]	Elektrische weerstand [Ω]
30.8	1.38	3.27	4.65	2.5	591.95	0.0017

Na het verkrijgen van de elektrische weerstand kan berekend worden hoeveel warmte ontstaat bij het verchromen.

Elektrische weerstand [Ω]	stroom [A]	spanning [V]	I*U [W]	I²*R [W]	Elektrolyse warmte
0.0017	12000	24	288000	250489	≈ 85%

Tabel 3: Elektrolyse warmte

Wisselen van walsen

Tijdens het proces zit de wals in de chroomtank, de wals wordt ook beschouwd als een thermische massa. Als er een wals in het bad zit wordt de totale warmtecapaciteit dus groter. De warmtecapaciteit die toegevoegd wordt kan volgens de volgende formule berekend worden:

$$Q_w = m \cdot c [kJ] \quad (7)$$

Q_w = warmtecapaciteit van de wals [kJ]

m = massa van de wals [kg]

c = soortelijke warmte staal ("Soortelijke warmte", maart 2014) [J / (g * K)]

$m [kg]$	$c [J / (g * K)]$	$Q_w [kJ]$
4000	0.466	1864

Tabel 4: Thermische massa van een wals

De totale warmtecapaciteit wordt tijdens het verchromen dan:

Warmtecapaciteit elektrolyt [kJ]	Warmtecapaciteit wals [kJ]	Totale warmtecapaciteit [kJ]
75600	1864	77464

Het gewicht van de wals kan variëren waardoor de warmtecapaciteit die toegevoegd wordt niet altijd gelijk is. Dit wordt in het model meegenomen, bovenstaande wals is bedoeld om een idee te krijgen bij de omvang t.o.v. de thermische massa van het elektrolyt.

Naast de thermische massa die toegevoegd wordt zal de wals afhankelijk van zijn temperatuur ook energie opnemen of afgeven. Omdat het staal van de wals in direct contact is met het elektrolyt geldt de volgende formule:

$$q = h_c \cdot A \cdot dT [W]$$

q = warmteoverdracht per tijdseenheid [W]

h_c = convectie warmteoverdrachtscoëfficiënt [W/(m²K)]

A = warmteoverdracht oppervlakte [m²]

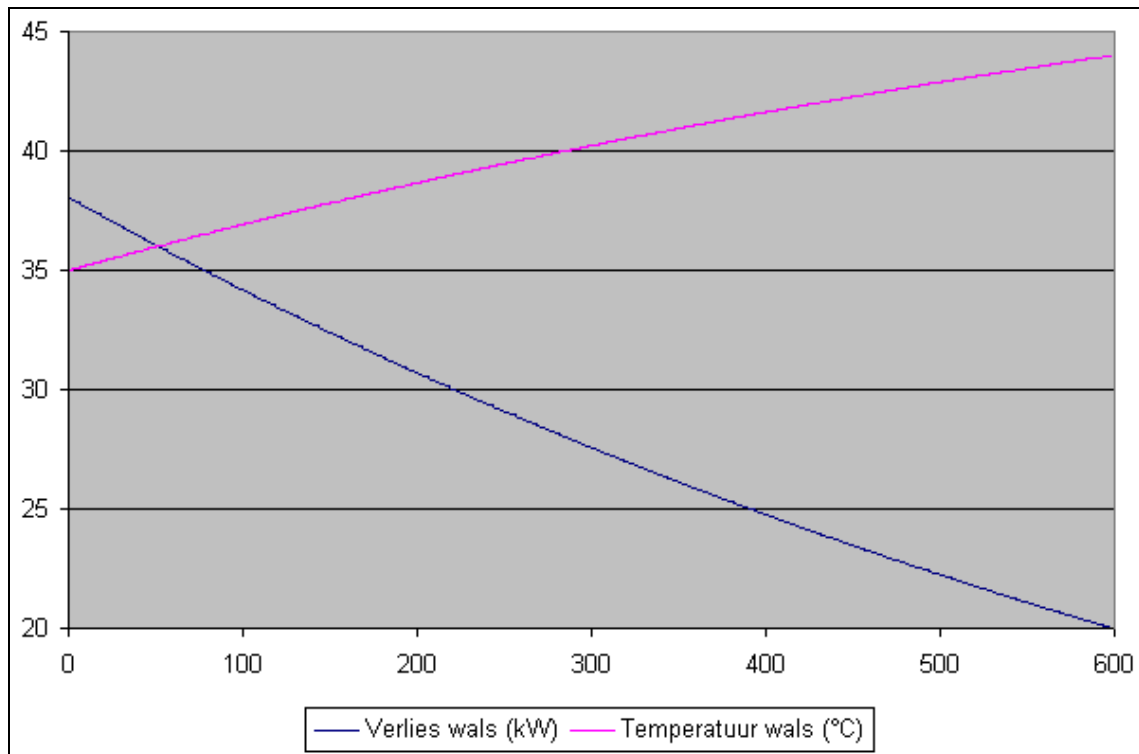
dT = temperatuurverschil vloeistof en wals [°C]

Omdat de convectie warmteoverdrachtscoëfficiënt niet bekend is en ook niet te bepalen, wordt een schatting gedaan. Omdat de temperatuur van de wals niet bekend is wordt deze, aan de hand van data logging, geschat op 35 graden.

A [m ²]	dT [°C]	h_c [W/(m ² K)]	q [W]
4	19	500	38000

Tabel 5: Convectie warmte overdracht van de wals

Door de warmte overdracht van het elektrolyt naar de wals zal de wals opwarmen en het verschil in temperatuur afnemen. Dit heeft als gevolg dat de verliezen ook afnemen naarmate de temperatuur van de wals toeneemt. Dit wordt hieronder afgebeeld.



Figuur 6: oplopende temperatuur van de wals en afnemende verlies

Warmtewisselaars

Voor zowel het koelen als het verwarmen worden warmtewisselaars in het bad gebruikt. Deze warmtewisselaars hebben dezelfde opbouw/constructie maar verschillen van oppervlakte. Voor het opwarmen wordt stoom gebruikt en voor het koelen wordt gekoeld water gebruikt.

Een warmtewisselaar heeft een warmtestroom door een wand. Deze kan als volgt berekend worden (Ouwehand, Papa, Post, & Taal, 2001):

$$\Phi_W = U \cdot A \cdot \Delta T_{Gem} \quad (7)$$

hierin

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_a} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_b}} \quad (8)$$

Φ_W = warmtestroom [W]

U = warmtedoorgangscoefficiënt [$W / m^2 K$]

ΔT_{Gem} = gemiddeld temperatuurverschil over de wand [K]

A = warmte-uitwisselend oppervlak [m^2]

α_a = warmteoverdrachtscoëfficiënt bij medium a [$W / m^2 K$]

d = wanddikte [m]

λ = warmtegeleidingcoëfficiënt van het wandmateriaal [W / mk]

α_b = warmteoverdrachtscoëfficiënt bij medium b [$W / m^2 K$]

Om het gemiddelde temperatuurverschil over de wand te kunnen berekenen is de volgende formule:

$$\Delta T_{\ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (9)$$

$\Delta T_{\ln}$ = logaritmisches temperatuurverschil [K]

ΔT_1 = temperatuurverschil tussen medium a en b bij zijde 1 [K]

ΔT_2 = temperatuurverschil tussen medium a en b bij zijde 2 [K]

De benodigde gegevens zijn uit documentatie gehaald aanwezig bij HoCo-RST.

$A [m^2]$	$\alpha_a [W / m^2 K]$	$d [m]$	$\lambda [W / mk]$	$\alpha_b [W / m^2 K]$	$U [W / m^2 K]$	$\Delta T_{Gem} [K]$	$\Phi_w [W]$
43.6	480	0.0006	0.18	820	150.7	22.54	148090

Tabel 6: Berekening vermogen koeling

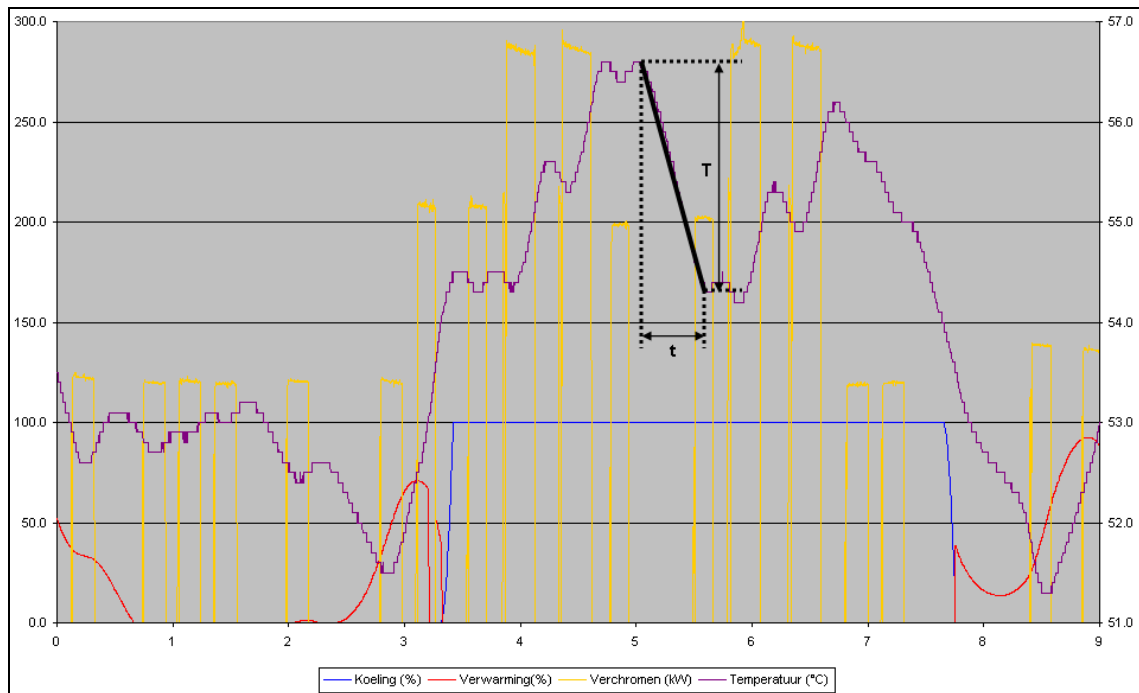
$A [m^2]$	$\alpha_a [W / m^2 K]$	$d [m]$	$\lambda [W / mk]$	$\alpha_b [W / m^2 K]$	$U [W / m^2 K]$	$\Delta T_{Gem} [K]$	$\Phi_w [W]$
14.5	1150	0.0006	0.18	820	184.4	45.66	122095

Tabel 7: Berekening vermogen verwarming

Uit data logging blijkt dat het vermogen om te koelen of verwarmen in theorie niet overeenkomt met de praktijk. De oorzaak hiervan is vervuiling van de warmtewisselaars. Om deze verschillen op te vangen is zowel een factor voor de koeling als voor de verwarming in het model geïmplementeerd.

Koelen

Het vermogen van de koeling kan uit data logging bepaald worden. Dit kan omdat de verliezen en de warmtecapaciteit van het elektrolyt hiervoor bepaald zijn. Bij de aangegeven temperatuur daling is de enige onbekende dus de koeling.



Figuur 7: data logging voor het bepalen van het koelvermogen

$$P_{vl} + P_k = \frac{Q_e \cdot \Delta T}{t} = \frac{75600 \cdot 2.3}{1920} = 90[kW]$$

$$P_k = 90 - P_{vl} = 90 - 50 = 40[kW]$$

P_{vl} = verlies (hiervoor bepaald) $[kW]$

P_k = koelvermogen $[kW]$

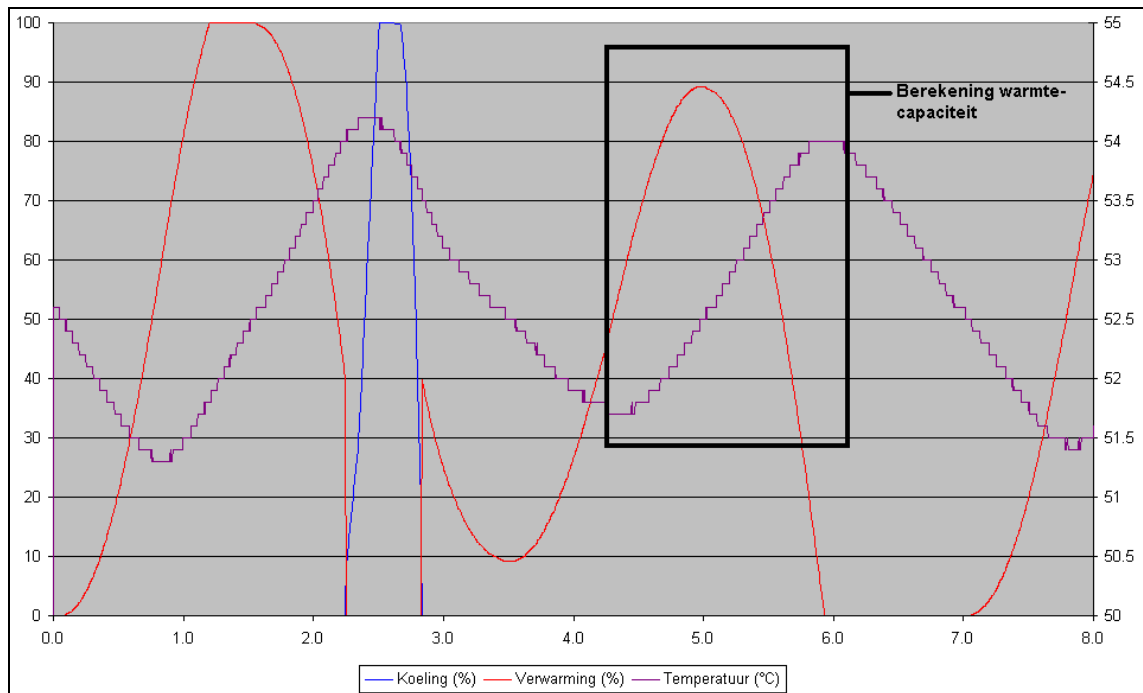
Q_e = warmtecapaciteit van het elektrolyt (hiervoor bepaald) $[kJ/^\circ C]$

ΔT = temperatuurverschil $[^\circ C]$

t = tijd $[s]$

Verwarmen

Er wordt bepaald wat het vermogen in de praktijk is, dit wordt berekend aan de hand van een data logging waarbij niet geproduceerd wordt, er wordt hierbij rekening gehouden met de dode tijd (in het zwart wordt het gebied van de berekening aangegeven):



Figuur 8: data logging zonder productie voor het berekenen verwarmingsvermogen

$$P_v - P_{vl} = \frac{Q_e \cdot \Delta T}{t} = \frac{75600 \cdot 2.3}{6500} = 26.75$$

De verliezen zijn bekend: $P_{vl} \approx 50[kW]$

$$P_v = 26.75 + P_{vl} = 26.75 + 50 = 76.7$$

De verwarming staat gemiddeld 75.8% open, dus om vermogen te berekenen:

$$P_{v \max} = \frac{76.7}{0.758} \approx 100[kW]$$

$$P_v = \text{verwarming } [kW]$$

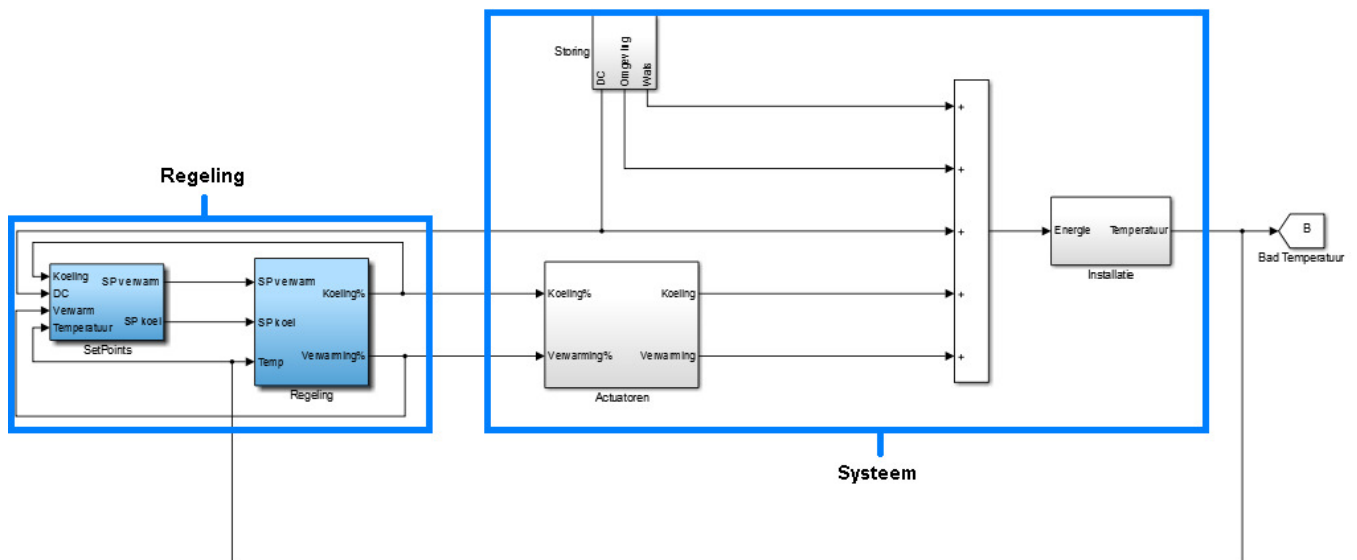
$$P_{v \max} = \text{maximaal haalbare verwarmcapaciteit } [kW]$$

5. Model

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van het model. Een meer gedetailleerde beschrijving van het model en de opbouw hiervan kan gevonden worden in Bijlage 1: Modelbeschrijving in detail. Dit model is gemaakt met behulp van de software MATLAB Simulink. Na het vormen van het model wordt het model, met behulp van data logging, gevalideerd. Blijkt het model valide te zijn, dan kan aan de hand hiervan een regeling ontworpen en getest worden.

5.1 Opbouw van het model

Om het model overzichtelijk te houden is gewerkt met subsystemen. Zo is er een subsysteem voor de installatie, de actuatoren, de storing en de regeling (in blauw). Om de parameters overzichtelijk en makkelijk aanpasbaar te maken worden deze ingevuld in Excel. Via een script in MATLAB worden de parameters vervolgens geladen in het model. De installatie en actuatoren zijn niet beïnvloedbaar, na validatie worden deze niet meer aangepast. De regeling is eerst, zoals huidig aanwezig, nagemaakt.



Figuur 9: totaalschema model met huidige regeling

Voor het modeleren van de installatie en de actuatoren worden de resultaten van voorgaande onderzoeken gebruikt.

5.1.1 Systeem

De subsystemen van de installatie met verstoring en actuatoren (systeem) worden hier besproken.

Installatie

Het systeem is het chroombad met een dode tijd. Het chroombad wordt aanschouwd als thermisch buffer. Er wordt energie ingestopt en uitgehaald. Aan de hand van de ingaande en uitgaande energie verandert de temperatuur. Ook kan er een wals zich in het chroombad bevinden, deze thermische massa wordt dan ook meegenomen.

Actuatoren

De actuatoren zijn de middelen waarmee de temperatuur beïnvloed kan worden, in dit geval de koeling en de verwarming. De aansturing voor de actuatoren komt vanuit de regeling. Deze aansturing is voor zowel de koeling als de verwarming 0-100% (met 100% volledig aan). De uitgangen geven het gevraagde vermogen (koelen/verwarmen). Dit wordt gedaan via software gebaseerd op de eerder verrichte onderzoeken.

Verstoring

Onder verstoring wordt verstaan: de voor dit project niet beïnvloedbare invloeden op de temperatuur. Deze verstoringen worden verdeeld in de volgende groepen:

- *Verchromen*

De warmte die vrijkomt tijdens het verchromen wordt hierin beschreven. Om tot een reële benadering te komen wordt gebruik gemaakt van de gegevens van een eerder uitgevoerde productie periode.

- *Omgevingsverlies*

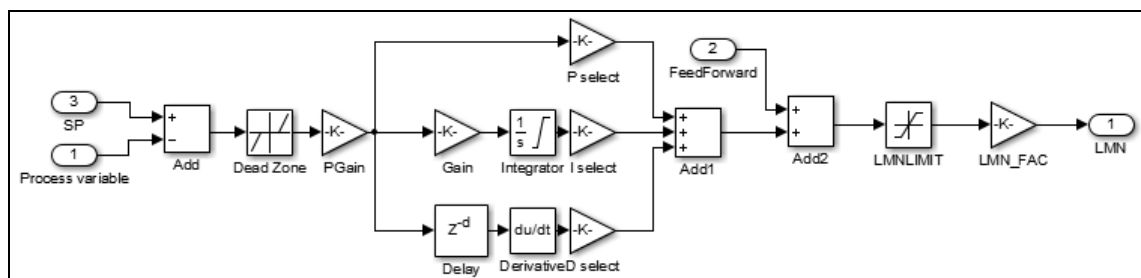
De thermische verliezen aan de omgeving. Dit zijn de verliezen door de wand van het chroombad en de verliezen aan de (open) bovenkant van het chroombad.

- *Wals wisselen*

Tijdens het wisselen van de wals zal deze, afhankelijk van de wals temperatuur, een bepaalde hoeveelheid energie opnemen of afgeven.

5.1.2 Huidige regeling

Het regelen van de koel- en verwarmklep gebeurt met een regeling geprogrammeerd in een Siemens S7 PLC. Deze regeling bestaat uit een tweetal PI regelaars, één voor koelen en één voor verwarmen, en een programma. Voor meer informatie over de PI regelaars behorend bij de Siemens S7 PLC zie Bijlage 2: Siemens S7 PID documentatie. Deze regelaars zijn op basis van de documentatie gemodelleerd in MATLAB Simulink.



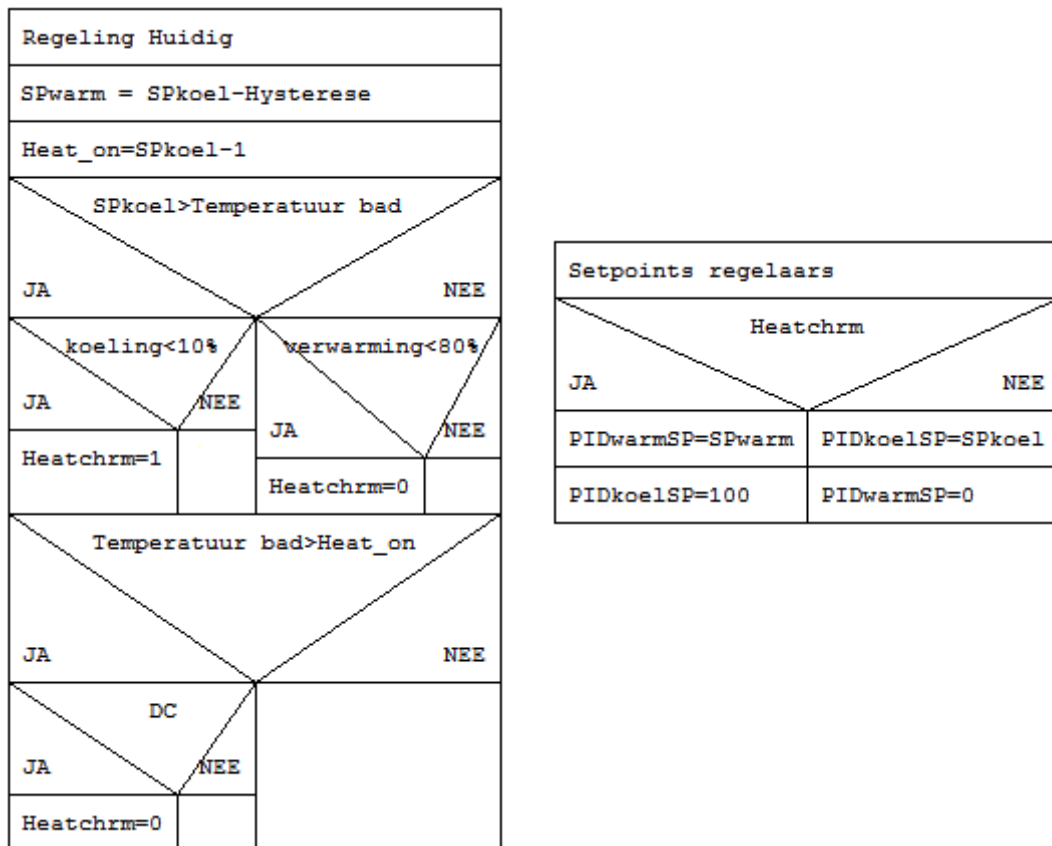
Figuur 10: gemodelleerde PID regelaar

De regelaars hebben de volgende instellingen:

Parameter	Koeling	Verwarming
P_SEL	TRUE	TRUE
I_SEL	TRUE	TRUE
D_SEL	FALSE	FALSE
SP_INT	54 °C	52.5 °C
GAIN	2	1
TI	2s	20s

Tabel 8: parameters huidige regeling

Om het PLC programma overzichtelijk weer te geven worden twee Nassi-Schneiderman diagrammen (PSD's) met een beschrijving weergegeven.



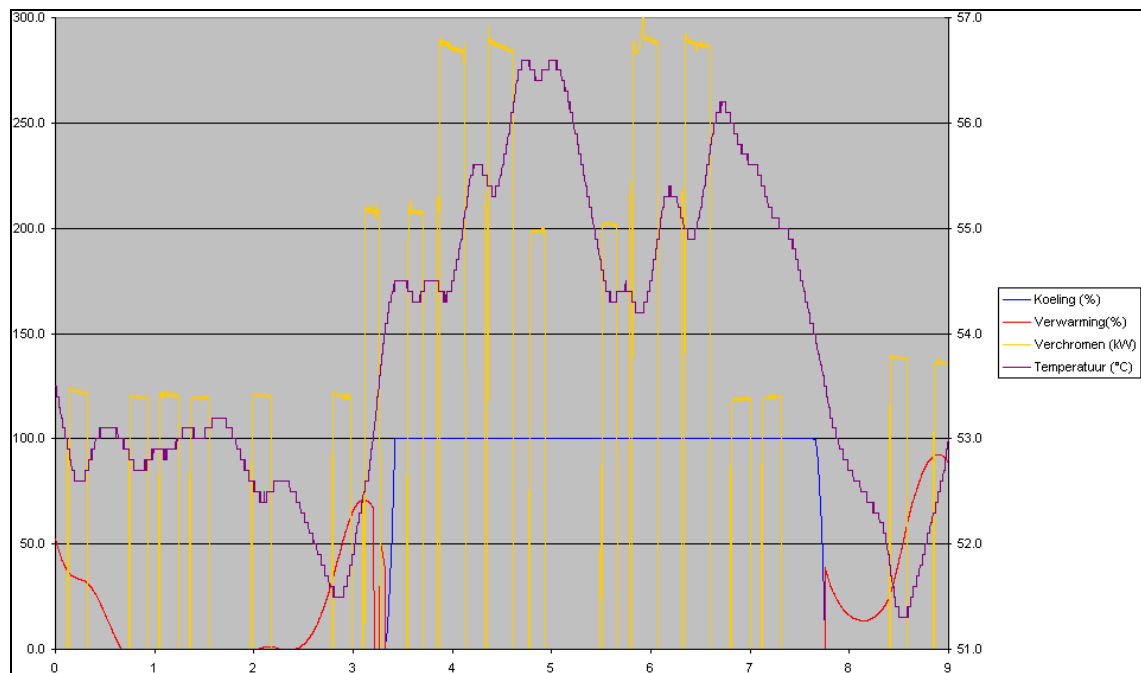
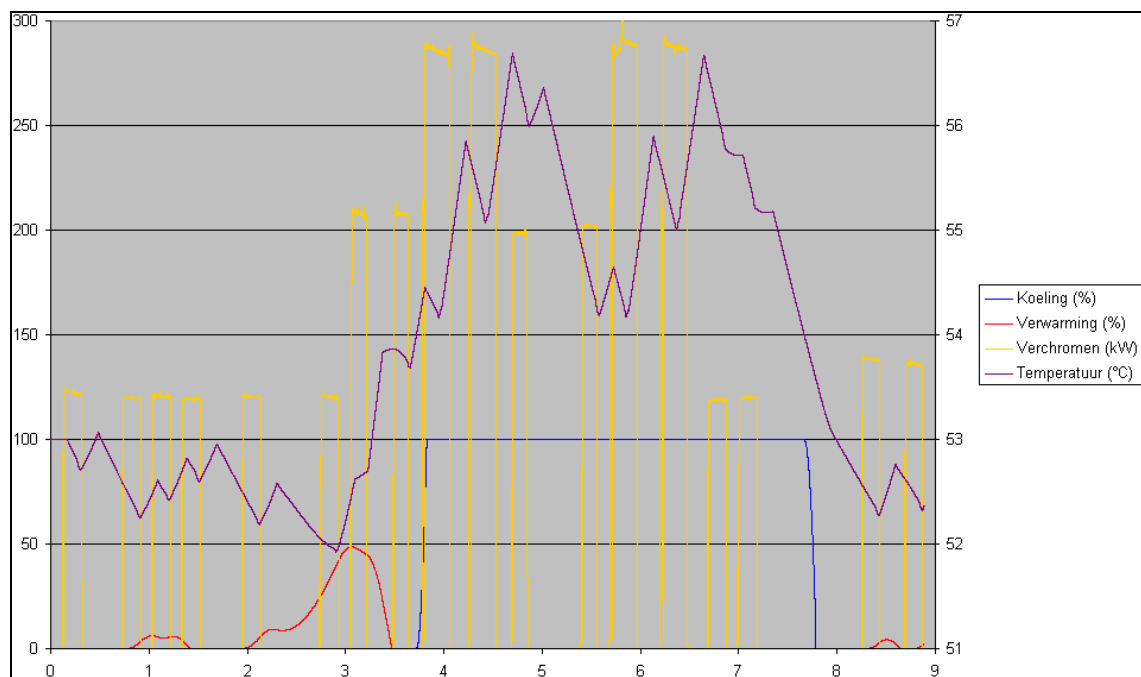
Figuur 11: PSD's huidige regeling

De huidige regeling maakt gebruik van veranderende Setpoints, het eerste diagram beschrijft hoe bepaald wordt of gekoeld of verwarmd moet worden. Bij de tweede diagram wordt beschreven welke SetPoints gekozen worden. De variabele SPkoel wordt ingegeven door de gebruiker.

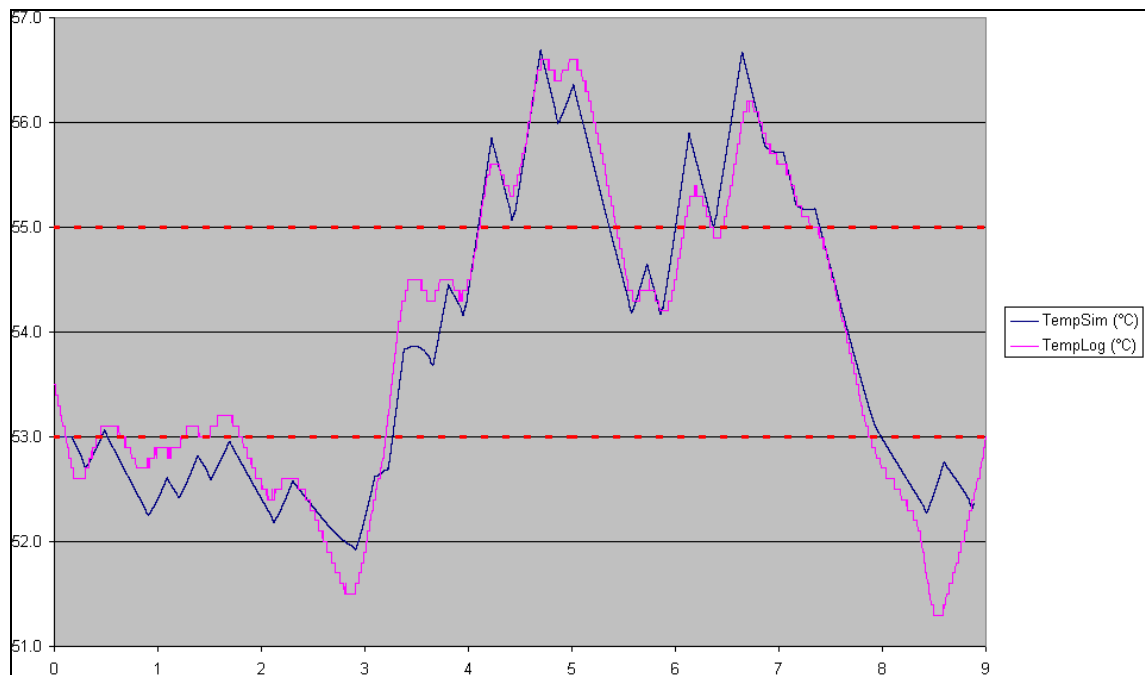
5.2 Validatie van het model

Om het model te valideren wordt gebruik gemaakt van data loggingen. Deze worden vergeleken met de uitkomst van het model. Tijdens het valideren, wat in eerste instantie werd gedaan met het in theorie berekende koel- en verwarm vermogen, bleken grote afwijkingen te zitten. Om de uitkomst overeenstemmend te maken zijn deze parameters teruggerekend vanuit data logging. Het aanpassen van deze parameters is in de onderzoeksfase al bewerkt. De validatie is verder uitgevoerd met de aangepaste parameters.

Bij onderstaande grafieken is de temperatuur op de secundaire y-as getoond.

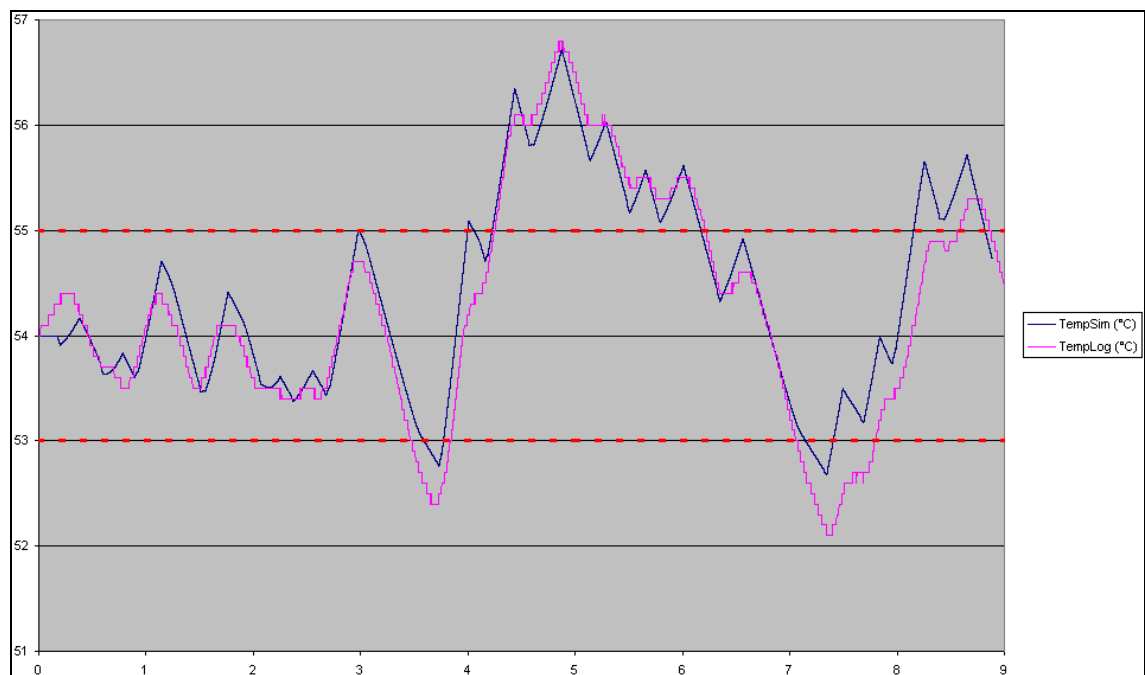
*Figuur 12: data logging van het verchromen**Figuur 13: simulatie van het verchromen*

De uitkomst van de simulatie, aan de hand van het model, is gebaseerd op dezelfde productie als de data logging. De nauwkeurigheid en de correctheid van het model kan bepaald worden door deze te vergelijken.



Figuur 14: vergelijking van de simulatie met de data logging

Het vergelijking van één data logging met het model geeft niet veel zekerheid, daarom is er ook een tweede vergelijking gemaakt.



Figuur 15: vergelijking 2 van de simulatie met de data logging

Uit de vergelijkingen blijkt dat de simulatie in grote lijnen overeenkomt met de data logging. Ook komen de hellingen grotendeels overeen. Dit betekent dat de invloeden op de temperatuur goed overeenkomen met de werkelijkheid.

Echter zijn in de vergelijkingen ook verschillen te zien. Deze verschillen kunnen verklaard worden door de onbepaalde invloeden, die vaak niet (goed) te meten zijn, of sterk kunnen variëren. Deze onbepaalde invloeden zijn:

- Temperatuur van de wals. De temperatuur van de wals die verchroomd wordt is niet bekend en kan sterk verschillen.
- Temperatuur van de omgeving. De omgevings- en grond temperatuur wordt niet gemeten en kan variëren.
- Temperatuur van het koelwater, in en uitgaand. Deze wordt niet gemeten en heeft invloed op de koelcapaciteit.
- Temperatuur van het stoom, in en uitgaand. Deze wordt niet gemeten en heeft invloed op de verwarmingscapaciteit.

In het model zijn al deze parameters geschat. In totaal kan hierdoor dus een merkbare afwijking tussen model en data logging ontstaan. Echter voor het ontwerpen van een regeling is het model valide.

6. Ontwerpen van een regeling

Bij het ontwerpen van een regeling zijn er een aantal criteria waaraan de regeling moet voldoen. Zo mag er niet “teveel” doorschot zijn, moet de regeling tijdig reageren en moet de regeling stabiel zijn. Deze criteria zijn opgenomen in de eisen en worden per stuk behandeld.

Aan de hand van de eisen wordt gekeken naar het instellen van de regelaar voor zowel de verwarming als de koeling en het toepassen van Feed Forward.

6.1 Eisen en problemen

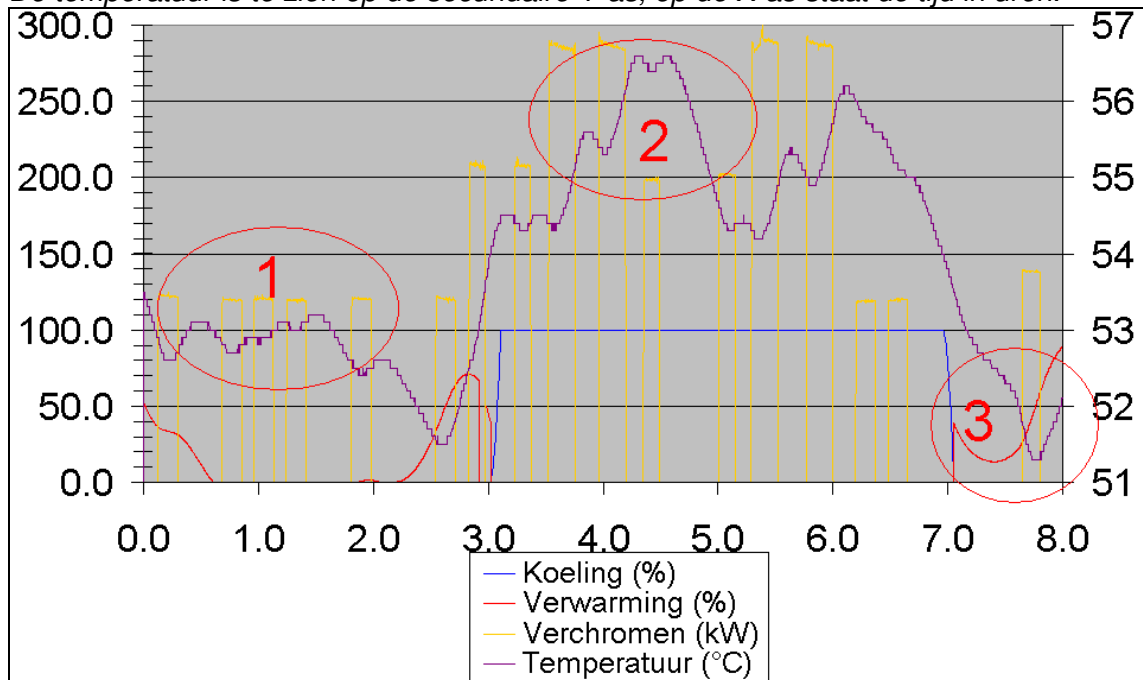
Bij het verchromen van walsen is de temperatuur, zoals eerder in de onderzoeksfase behandeld, van groot belang. Door de opdrachtgever zijn hiervoor eisen opgesteld, hieronder worden deze eisen behandeld en naar de haalbaarheid gekeken. Vervolgens wordt de onderbouwing over de haalbaarheid gegeven.

Eis	Haalbaarheid	Onderbouwing
Minimale temperatuur 53 °C	Goed	Aanpassen van instellingen van de regelaar om onderschot te voorkomen
Maximale temperatuur 55 °C	Slecht	Om hoge temperaturen te voorkomen is te weinig koelcapaciteit beschikbaar
Stabiele temperatuur zonder productie	Goed	Aanpassen van instellingen van de regelaar
Overschot van verwarming maximaal 10%	Goed	Aanpassen van instellingen van de regelaar

Tabel 9: eisen met haalbaarheid en beredenering

Om aan de eisen te voldoen moet gekeken worden waar momenteel de problemen liggen. Voor elk van de voorkomende problemen moet een oplossing gevonden worden. Dit kan gebeuren door het instellen van de regelaar, Feed Forward, of d.m.v. software.

De temperatuur is te zien op de secundaire Y-as, op de X-as staat de tijd in uren.



Problemen

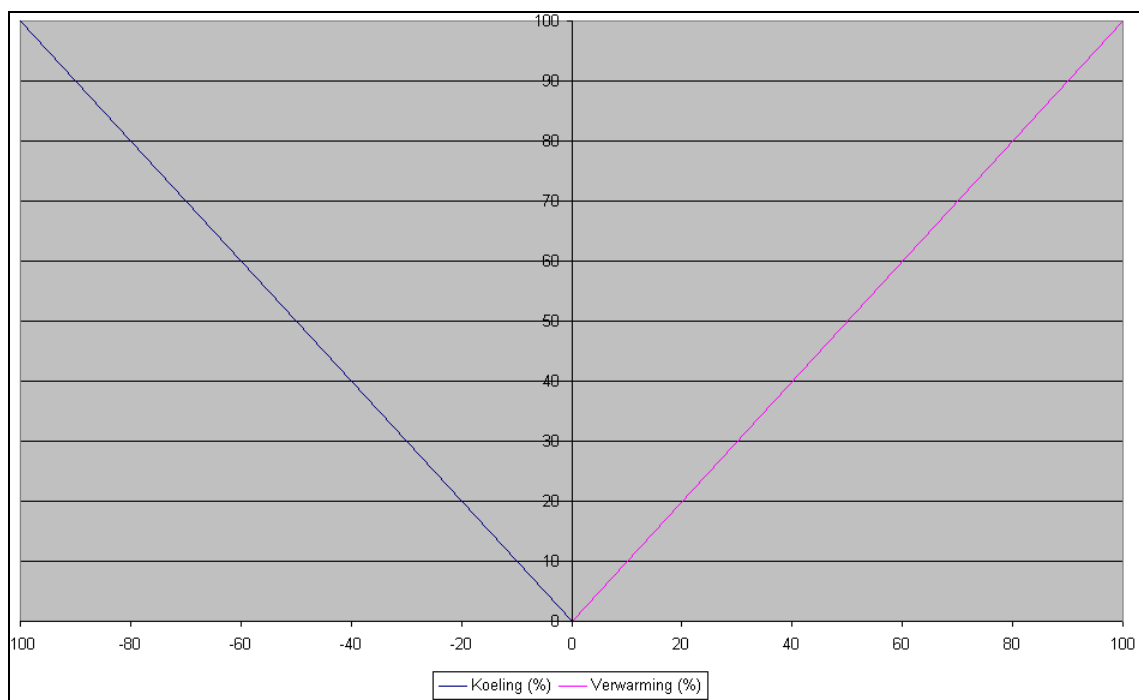
1. Door de grote dode tijd in het systeem loopt de temperatuur pas enige tijd na het verchromen op. Dit heeft als gevolg dat de koeling pas laat aanslaat.
2. Bij het verchromen van grote walsen zijn hoge vermogens nodig. Dit zorgt voor een flinke overschot in de temperatuur van het bad.
3. Naast overschot is er ook onderschot, de koeling blijft te lang aan en de verwarming gaat, door het gebruik van twee aparte setpoints, te laat aan.
4. Het gebruik van twee aparte regelaars kan als een probleem gezien worden. Dit bemoeilijkt het ontwerpen van een regeling.

Oplossingen

1. Met Feed forward de dode tijd in het systeem compenseren.
2. De voorgaande oplossing heeft ook effect op het overschot, maar biedt geen oplossing, door de Feed Forward zal eerder gekoeld worden en dus het overschot verminderd. Voor het volledig voorkomen van overschot is te weinig koelcapaciteit beschikbaar.
3. Voor het voorkomen van onderschot moeten de instellingen van de regelaar tijdens het koelen aangepast worden.
4. Het implementeren van een split range regelaar, deze verzorgt zowel het koelen als het verwarmen.

6.2 Split range

Voor het regelen van een temperatuur is het ongebruikelijk om twee aparte regelaars te gebruiken. Over het algemeen wordt gebruik gemaakt van een Split Range regeling. Dit wilt zeggen een regeling die zowel de koeling als de verwarming aanstuurt en dus het uitgangsignaal opdeelt. Bij het gebruiken van een split range regeling is het ook niet mogelijk de koeling en verwarming gelijktijdig in te schakelen. Bij het gebruik van meerdere regelaars moet hier vaak extra software voor gebruikt worden. Bovendien is bij het gebruik van een split range regeling het gebruik van Feed Forward eenvoudiger te implementeren. In het model is gebruik gemaakt van een split range regelaar met een bereik van -100% t/m 100%, waarbij 0% t/m -100% het koelen is en 0% t/m 100% het verwarmen.



Figuur 16: uitgang split range regelaar

De verwarming heeft een verwarmcapaciteit van ongeveer 100kW, de koeling heeft een koelcapaciteit van ongeveer 40kW. Met deze gegevens kan berekend worden hoeveel Feed Forward gegeven moet worden om de warmte van het proces te compenseren:

- Als de warmte die ontstaat bij het verchromen minder is dan de warmte toegevoerd door de verwarming, wordt de aansturing van de verwarming verminderd.
- Als de warmte die ontstaat bij het verchromen meer is dan de warmte toegevoerd door de verwarming, wordt de verwarming uitgeschakeld en de koeling een bepaalde hoeveelheid ingeschakeld.
- Als de koeling al aanstaat en er komt warmte bij van het verchromen, zal de koeling meer aansturing krijgen.

6.3 Regelen van de verwarming

Het instellen van de verwarming gebeurt volledig aan de hand van de PI regelaar. Er wordt met verschillende methodes gezocht naar de beste instellingen. Op deze manier kan een goede vergelijking gemaakt worden tussen de methoden en een optimale instelling gekozen worden. De verschillende methodes waar naar gekeken wordt zijn:

- *Praktijk ontwerp.* In de praktijk wordt vaak online de Ziegler-Nichols methode gebruikt, deze wordt gesimuleerd met het model.
- *Klassieke ontwerp formules.* Er zijn meerdere ontwerp formules die gebruik kunnen worden. Om deze uit te werken wordt de systeemoverdracht verkregen en wordt dit via MATLAB uitgewerkt.
- *Ontwerpen met een pn-beeld.* Een regeling kan ook ontworpen worden via het pn-beeld van het systeem. Dit gebeurt ook m.b.v. de systeemoverdracht

6.3.1 Praktijk ontwerp

Bij het instellen van een regelaar wordt in de praktijk vaak gewerkt aan de hand van ervaring en verschillende afstelregels. Een bekende afstemmethode is de Ziegler-Nichols methode. Deze wordt aan de hand van het model uitgevoerd en getest..

Ziegler Nichols

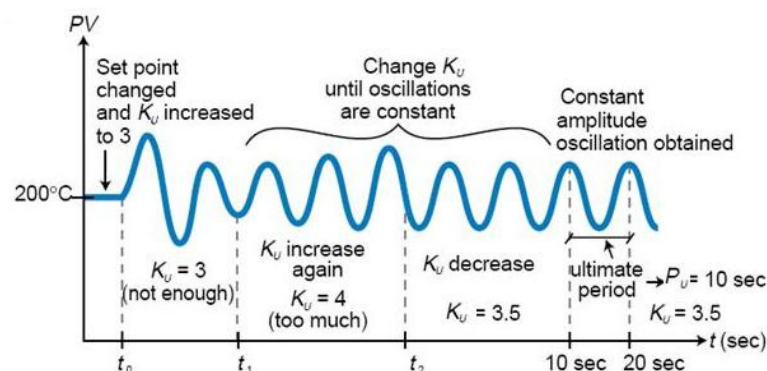
De Ziegler-Nichols methode (Smith & Corripio, 1997) is een methode voor het afstellen van P- PI- en PID regelaars. Deze methode wordt vaak on-line uitgevoerd en wordt veel toegepast bij het instellen van regelaars.

De Ziegler-Nichols methode bestaat uit twee stappen:

Stap1: Bepalen van de dynamische eigenschappen van de regelkring.

Stap2: Aan de hand van de dynamische eigenschappen van de regelkring de parameters van de regelkring bepalen.

Bij deze methode zijn de dynamische eigenschappen van de regelkring de ultieme versterking en ultieme periode bij een oscillerende proportionele regelkring. De ultieme versterking en ultieme periode kunnen zowel wiskundig als experimenteel bepaald worden. Als dit wiskundig bepaald dient te worden moeten echter wel de overdracht functies van alle componenten in de regelkring bekend te zijn, wat vaak niet het geval is.



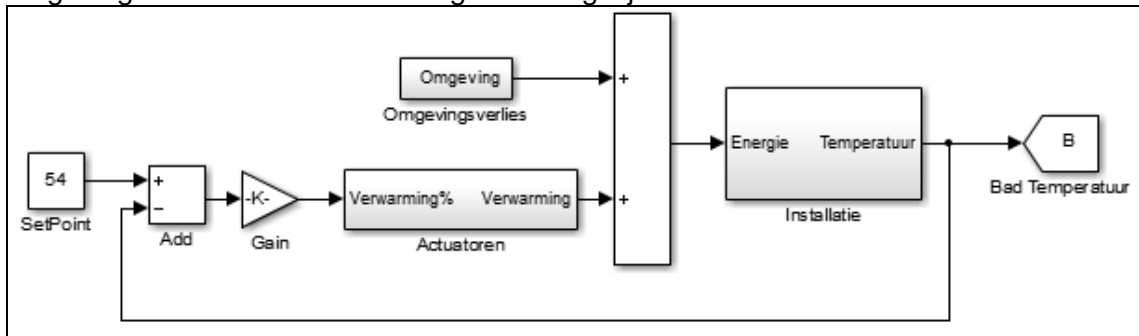
Figuur 17: Ziegler-Nichols methodiek ("PIDTuningClassical", jan 2013)

Omdat het systeem gemodelleerd is hoeft de ultieme versterking en ultieme periode niet on-line bepaald te worden, maar kan dit aan de hand van het model gebeuren. Om de ultieme versterking en ultieme periode te bepalen worden er drie stappen uitgevoerd:

1. Integreerende en differentiërende actie van de regelaar worden uitgeschakeld, waardoor een proportionele regelkring ontstaat.
2. De versterking van de regelaar wordt opgehoogd totdat er oscillatie met een constante amplitude ontstaat. Dit is de ultieme versterking.
3. Aan de hand van het model wordt bij de ultieme versterking de ultieme periode bepaald.

Bepalen PI waardes m.b.v. model

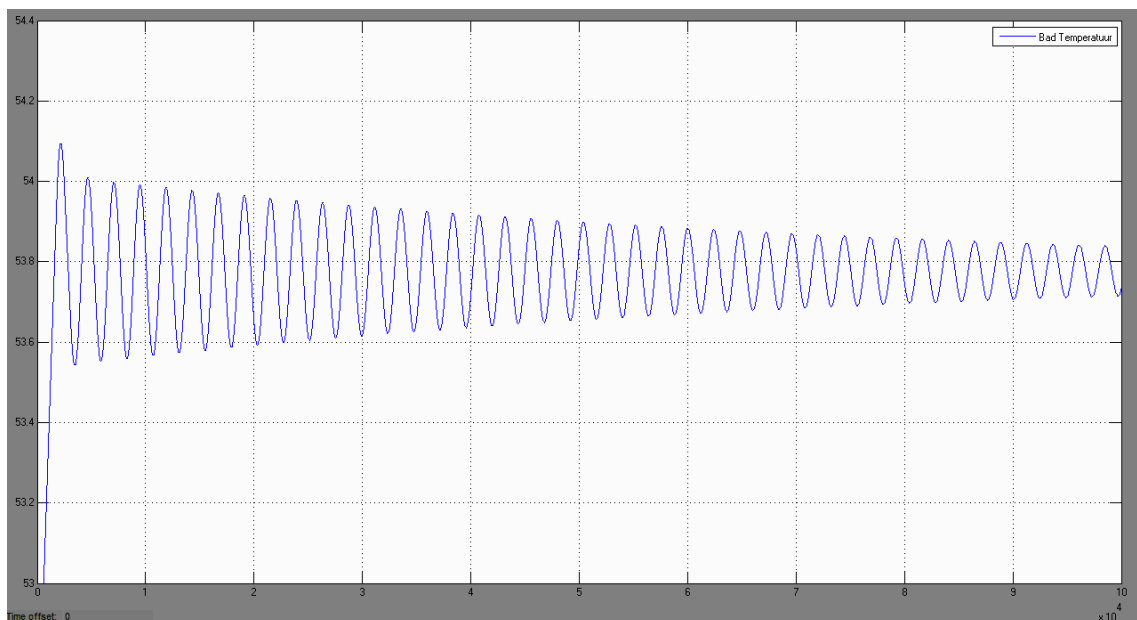
Om de ultieme versterking en ultieme periode te bepalen wordt het gemaakte model gebruikt. Tijdens het bepalen van de ultieme versterking wordt er niet geproduceerd/verchroomd. Ook wordt de koeling uitgeschakeld zodat alleen de omgevingsverliezen en verwarming aanwezig zijn.



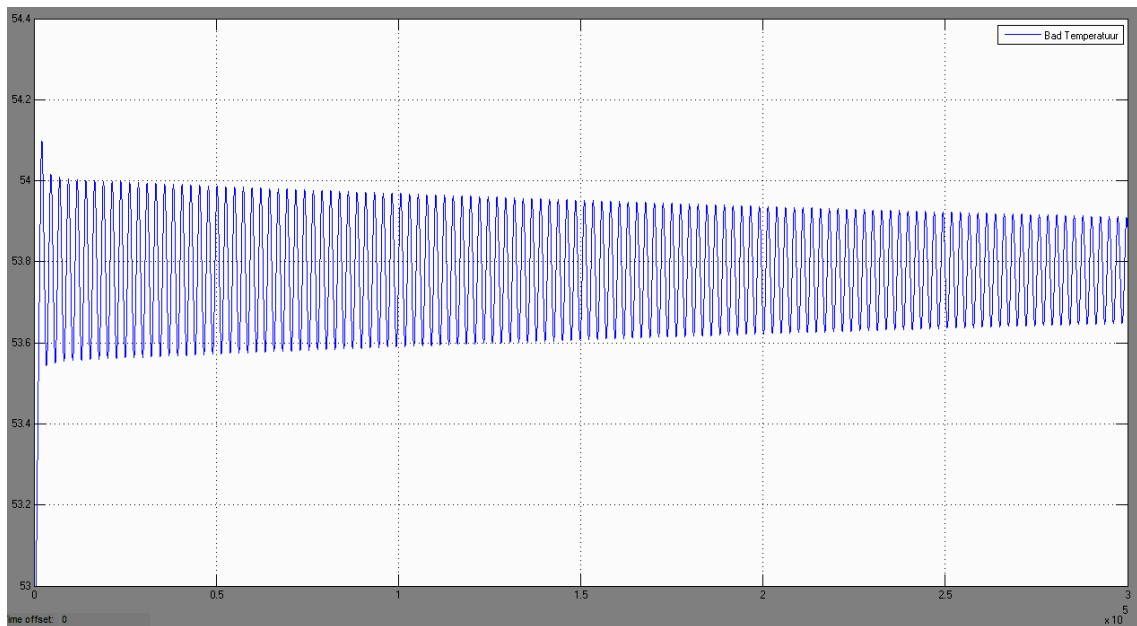
Figuur 18: schema proportioneel geregeld model voor het uitvoeren ZN methodiek

Er wordt nu gezocht naar de laagste waarde van de versterking waarbij de temperatuur oscilleert met een gelijke amplitude. Dit wordt gedaan door de versterking groter te maken tot dit optreedt.

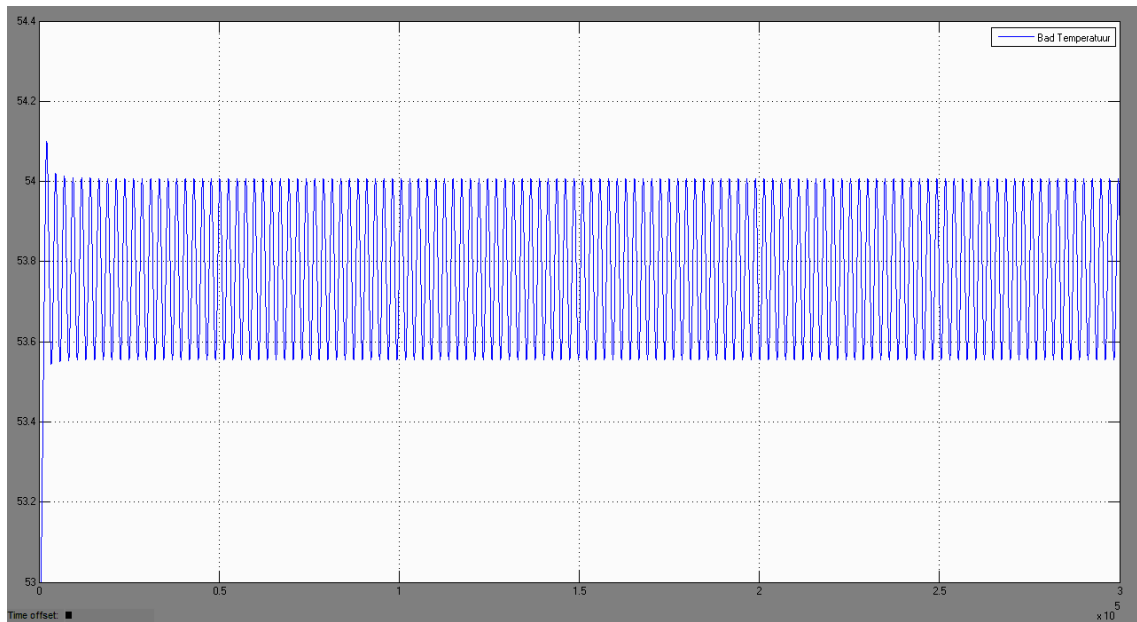
Bij de hieronder getoonde scopes wordt op de x-as de tijd in seconden weergegeven en op de y-as de temperatuur in °C.



Figuur 19: proportionele regelkring met een gain van 193



Figuur 20: proportionele regelkring met een gain van 195



Figuur 21: proportionele regelkring met een gain van 196

De bepaalde ultieme versterking K_{cu} en ultieme periode T_{cu} zijn als volgt:

$$K_{cu} = 196 \text{ en } T_{cu} = 2400[s]$$

Volgens de methode van Ziegler-Nichols kan nu de proportionele versterking en integratie tijd berekend worden.

Proportionele versterking	Integratie tijd (s)
$\frac{K_{cu}}{2.2} = \frac{196}{2.2} = \mathbf{89}$	$\frac{T_{cu}}{1.2} = \frac{2400}{1.2} = \mathbf{2000}$

Tabel 10: berekenen PI instellingen volgens ZN methode

6.3.2 Instellen regelaar volgens klassieke ontwerp formules

Om tot een regeling te komen moet eerst de systeemoverdracht bepaald worden. Het bepalen van deze systeemoverdracht wordt gedaan aan de hand van een differentiaalvergelijking gebaseerd op de warmtebalans van het systeem. Na het bepalen van de systeemoverdracht kan theoretisch een regeling ontworpen worden.

Systeemoverdracht

De overdrachtsfunctie kan bepaald worden vanuit de warmtebalans. Voor de warmtebalans moet gelden dat de toegevoerde warmte gelijk is aan de in het elektrolyt gebufferde warmte. Dit houdt in dat de ingebrachte warmte volledig in het elektrolyt opgenomen wordt, er zijn dus geen verliezen. Bij deze vergelijking is als referentietemperatuur de omgevingstemperatuur genomen (Schrage, Daal, & Stroeken, 2010).

$$c_e m_e \frac{dT_e}{dt} = q_{in}$$

Hieruit volgt de overdracht:

$$H_1(s) = \frac{T_e(s)}{Q(s)} = \frac{1}{c_e m_e s}$$

Om de differentiaalvergelijking uit te breiden kunnen de verliezen meegenomen worden, dit kan gedaan worden door de omgevingstemperatuur als referentietemperatuur te nemen. Er kan dan een warmte doorgangcoëfficiënt bepaald worden.

$$c_e m_e \frac{dT_e}{dt} + q_{verlies} T_e = q_{in}$$

De overdrachtsfunctie wordt dan:

$$H(s) = \frac{T_e(s)}{Q(s)} = \frac{1}{c_e m_e s + q_{verlies}}$$

Er zit echter ook nog een dode tijd in het systeem, het toevoegen hiervan geeft:

$$H(s) = \frac{e^{-\tau_d s}}{c_e m_e s + q_{verlies}}$$

Padé benadering

Vrijwel alle fysische processen bevatten dode tijd, ook wel looptijd genoemd. Een benaderingsmethode die veel wordt gebruikt, en ook aanwezig is in de MATLAB omgeving, is de zogenaamde Padé-benadering. De Padé benadering wordt in dit hoofdstuk uitgewerkt en vervolgens gebruikt voor het theoretisch ontwerp.

Eerste orde Padé-benadering

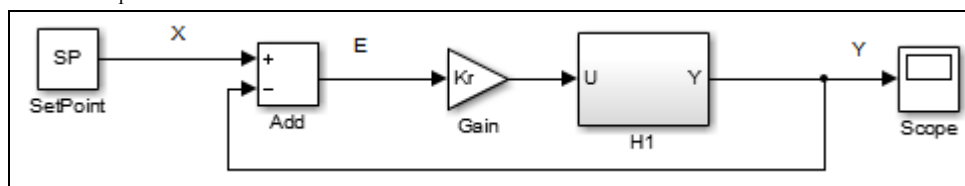
De eerste orde Padé-benadering wordt hier uitgewerkt, vervolgens wordt deze vergeleken met het model (Schrage, Daal, & Stroeken, 2010).

$$H_1(s) = \frac{e^{-\tau_d s}}{c_e m_e s + q_{verlies}}$$

$$e^{-\tau_d s} \approx \frac{1 - \frac{1}{2} s \tau_d}{1 + \frac{1}{2} s \tau_d}$$

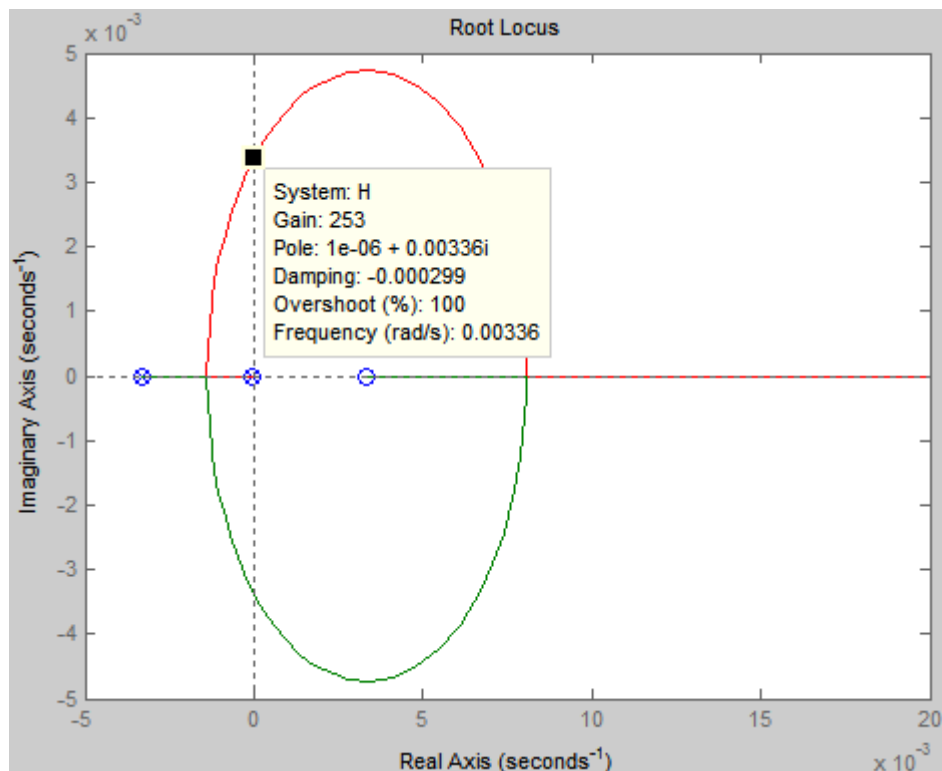
Het totale systeem is een gesloten systeem. De temperatuur wordt namelijk gemeten en gebruikt voor het aansturen van het regelsignaal. Dit geeft dus een eenheidsterugkoppeling, waardoor de volgende formule ontstaat:

$$H = \frac{Kr \cdot H_1}{1 + Kr \cdot H_1}$$



Figuur 22: eenheidsterugkoppeling

Het pn-beeld kan nu op eenvoudige wijze via MATLAB bepaald worden. Dit komt er dan als volgt uit te zien:



Figuur 23: pn-beeld systeem met eerste orde Padé-benadering

Uit het pn-beeld kan de ultieme periodetijd van de oscillatie (T_{cu}) en de ultieme versterking (K_{cu}) die hierbij hoort bepaald worden. Deze uitkomst kan vergeleken worden met het model

Parameter	Pn beeld	Model
K_{cu}	253	196
T_{cu}	1870	2400

Tabel 11: vergelijking model met uitkomst pn beeld met eerste orde pade

Te zien is dat er een groot verschil bestaat in de uitkomst van de theorie en het model. Dit grote verschil komt grotendeels voort uit de eerste orde Padé-benadering. Daarom wordt gekeken naar de tweede orde Padé-benadering.

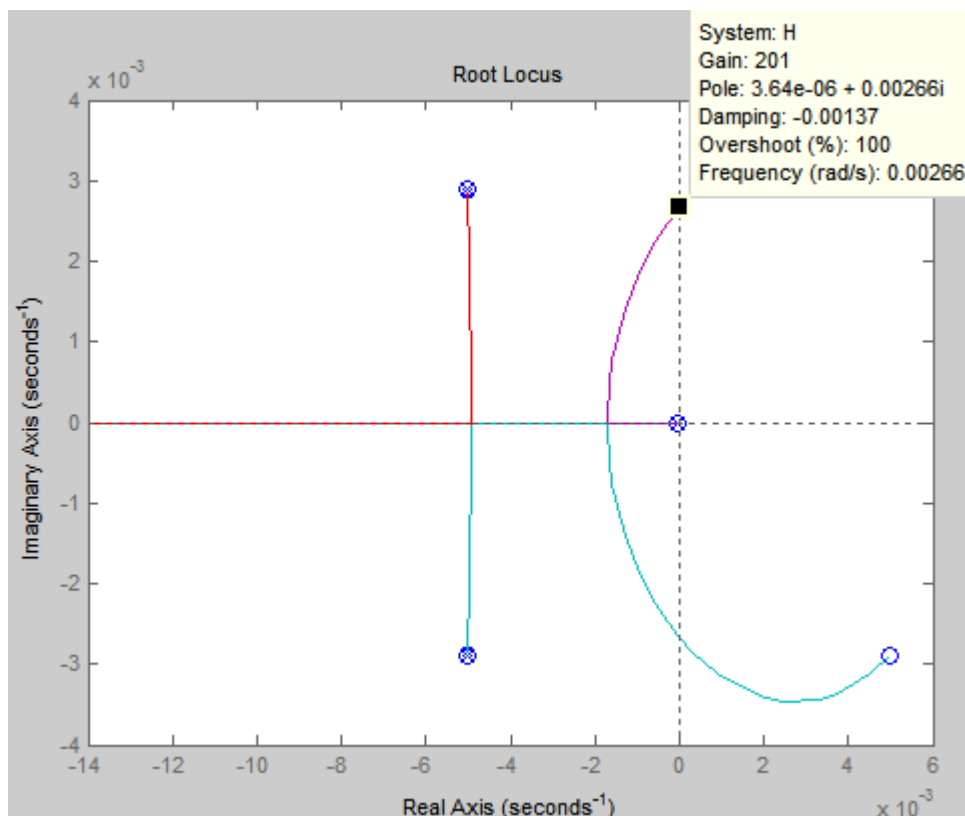
Tweede orde Padé-benadering

Omdat de eerste orde Padé-benadering vaak te veel zal afwijken wordt vaak met de tweede orde Padé-benadering gewerkt (Schrage, Daal, & Stroeken, 2010):

$$H_1 = \frac{e^{-\tau_d s}}{c_e m_e s + q_{verlies}}$$

$$e^{-\tau_d s} \approx \frac{s^2 - \frac{6}{\tau_d} s + \frac{12}{\tau_d^2}}{s^2 + \frac{6}{\tau_d} s + \frac{12}{\tau_d^2}}$$

Wederom wordt het pn-beeld via MATLAB gemaakt:



Figuur 24: pn-beeld systeem met tweede orde Padé-benadering

Uit het pn-beeld wordt de ultieme periodetijd en de ultieme versterking vergeleken met de uitkomst van het model:

Parameter	Pn beeld	Model
K_{cu}	201	196
T_{cu}	2362	2400

Tabel 12: vergelijking model met uitkomst pn beeld met tweede orde pade

Zoals te zien is neemt de nauwkeurigheid van de benadering sterk toe en komt deze theoretische benadering dicht in de buurt van de uitkomst van het model. Daarom wordt deze tweede orde Padé-benadering gebruikt voor het theoretisch ontwerpen van de regeling.

Instellen regeling volgens klassieke ontwerp formules

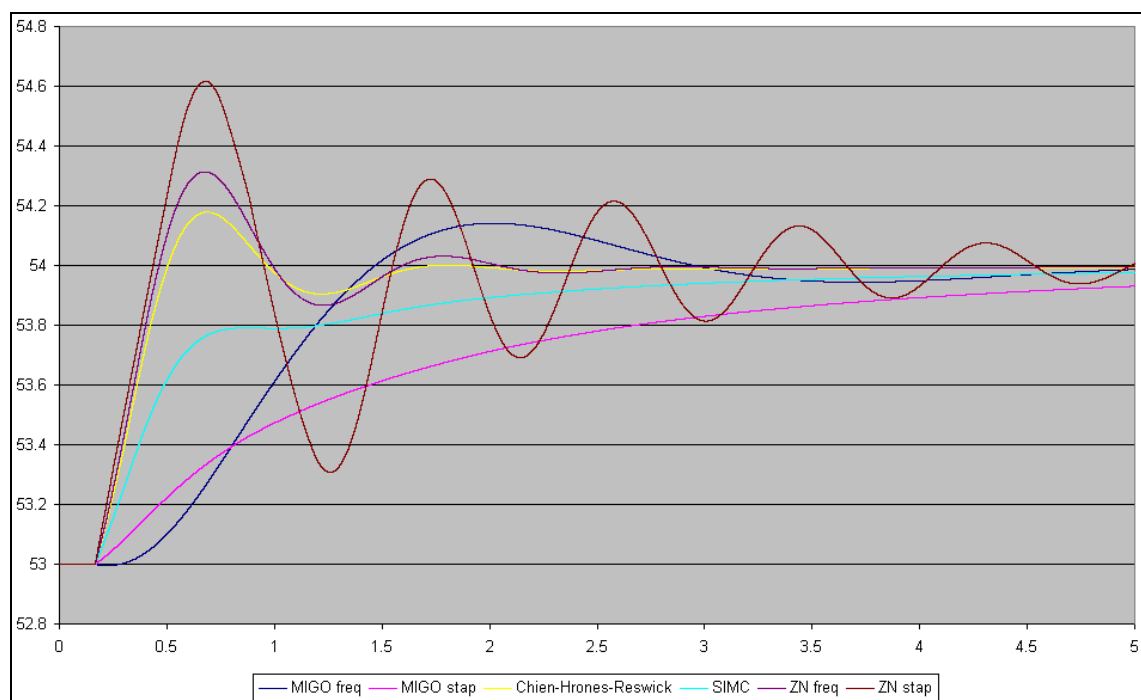
Er zijn veel klassieke ontwerp formules voor het instellen van regelaars. Een aantal hiervan zijn via sisotool in MATLAB uitgewerkt. De verschillende uitkomsten van de ontwerp formules worden hieronder weergegeven.

Ontwerp formule	GAIN	TI
MIGO frequentie responsie	31	2200
MIGO stap responsie	43	6200
Chien-Hrones-Reswick	77	2300
Skogestad IMC	64	4600
Ziegler-Nichols frequentie responsie	80	1900
Ziegler-Nichols stap responsie	114	1700

Tabel 13: instellingen volgens klassieke formules

Om de uitkomsten van deze ontwerp formules te vergelijken worden de stap responsies vergeleken. Het vergelijken van deze stap responsies geeft een duidelijk beeld van de hoeveelheid overschot, de rise tijd en de settling tijd. Dit zijn de eigenschappen die van belang zijn voor de verwarming.

Bij de hieronder getoonde stapresponsies wordt op de x-as de tijd in uren weergegeven en op de y-as de temperatuur in °C



Figuur 25: verschillende stap responsies van klassieke formules

Aan de hand van deze vergelijking is blijkt dat de optimale instelling voor dit systeem is gevonden met de Chien-Hrones-Reswick methode, ondanks het doorschot van meer dan 10%. Dit komt omdat deze relatief een goede settling tijd en rise tijd heeft. Volgens de klassieke ontwerp formules is de optimale instelling dus:

Proportionele versterking	Integratie tijd (s)
77	2300

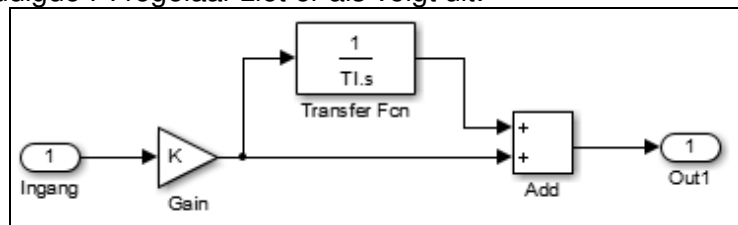
Tabel 14: optimale instelling volgens klassieke ontwerp formules

6.3.3 Ontwerpen met een pn-beeld

Voor het ontwerpen van een PI regelaar met een pn-beeld moet eerst de integrerende actie van de regelaar toegevoegd worden aan de systeemoverdracht.

Overdracht van een PI regelaar

Een vereenvoudigde PI regelaar ziet er als volgt uit:



Figuur 26: schema PI regelaar

De PI regelaar heeft de volgende overdrachtsfunctie:

$$H_{pi}(s) = K \cdot \frac{s + \frac{1}{\tau_i}}{s}$$

Samenvoegen van de PI regelaar en het systeem geeft als resultaat:

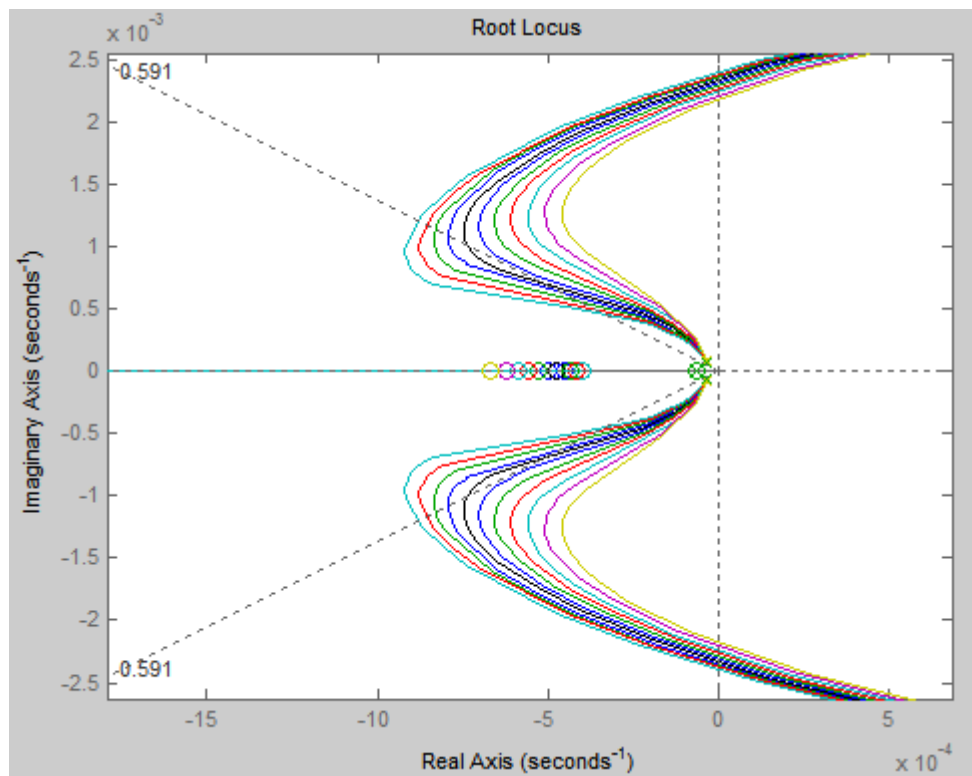
$$H_r(s) = K \cdot \frac{s + \frac{1}{\tau_i}}{s} \cdot \frac{e^{-\tau_d s}}{c_e m_e s + q_{verlies}} = K \cdot \frac{e^{-\tau_d s} (s + \frac{1}{\tau_i})}{s(c_e m_e s + q_{verlies})}$$

Om met een pn-beeld een regelaar in te stellen kunnen bepaalde eisen gesteld worden. Zo kan bijvoorbeeld een maximaal percentage overschot (%OS) gekozen worden. In de eisen is vastgesteld dat het overschot van de verwarming maximaal 10% bedraagt. Met het gekozen maximale overschot kan de dempingsfactor (ζ) berekend worden:

$$\zeta = \frac{-\log(\%OS/100)}{\sqrt{\pi^2 + \log(\%OS/100)^2}} = 0.591$$

Nu de dempingsfactor bepaald is worden voor verschillende integratietijden (τ_i) de pn-beelden getekend. Hierin wordt een lijn voor de dempingsfactor gemaakt. Echter omdat het hier een systeem van een orde hoger dan de 2^e betreft zal de dempingsfactor afwijken. Daarom wordt er via een vergelijking met stap responsies gezocht naar de beste instelling.

Er wordt hieronder een vergelijking gemaakt met verschillende integratie tijden. Bij het vergroten van de integratie tijd zullen de poolbanen in het pn-beeld verder in het linkervlak schuiven.

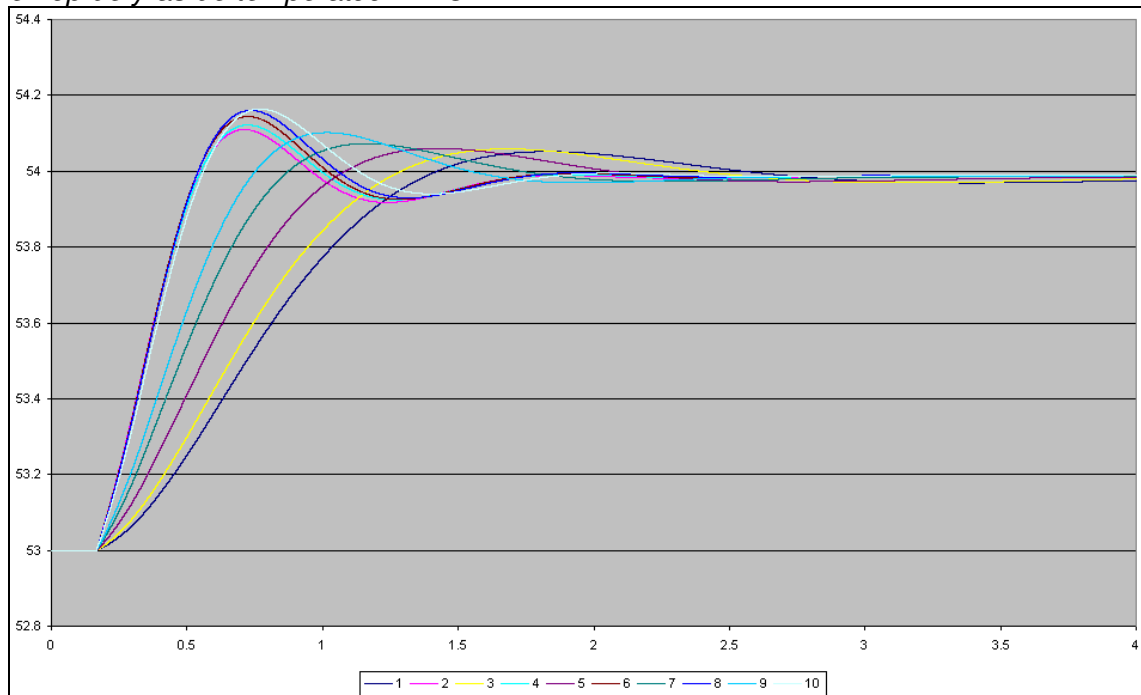


Figuur 27: pn-beeld met verschillende integratietijden

naam	GAIN	TI
Instelling1	39	2500
Instelling2	74	2500
Instelling3	41	2400
Instelling4	73	2400
Instelling5	46	2300
Instelling6	73	2300
Instelling7	52	2200
Instelling8	72	2200
Instelling9	56	2100
Instelling10	69	2100

Tabel 15: instellingen gevonden met gekozen dempingsfactor

Bij de hieronder getoonde stapresponsies wordt op de x-as de tijd in uren weergegeven en op de y-as de temperatuur in $^{\circ}\text{C}$.



Figuur 28: vergelijking verschillende instellingen met dempingsfactor 0.591

Er wordt gezocht naar de optimale instelling door te kijken naar settling- en rise tijd en naar het overshoot. De optimale instellingen zijn gevonden bij instelling2, deze voldoet aan de eis voor het overshoot en heeft een goede settling- en rise tijd.

Proportionele versterking	Integratie tijd (s)
74	2500

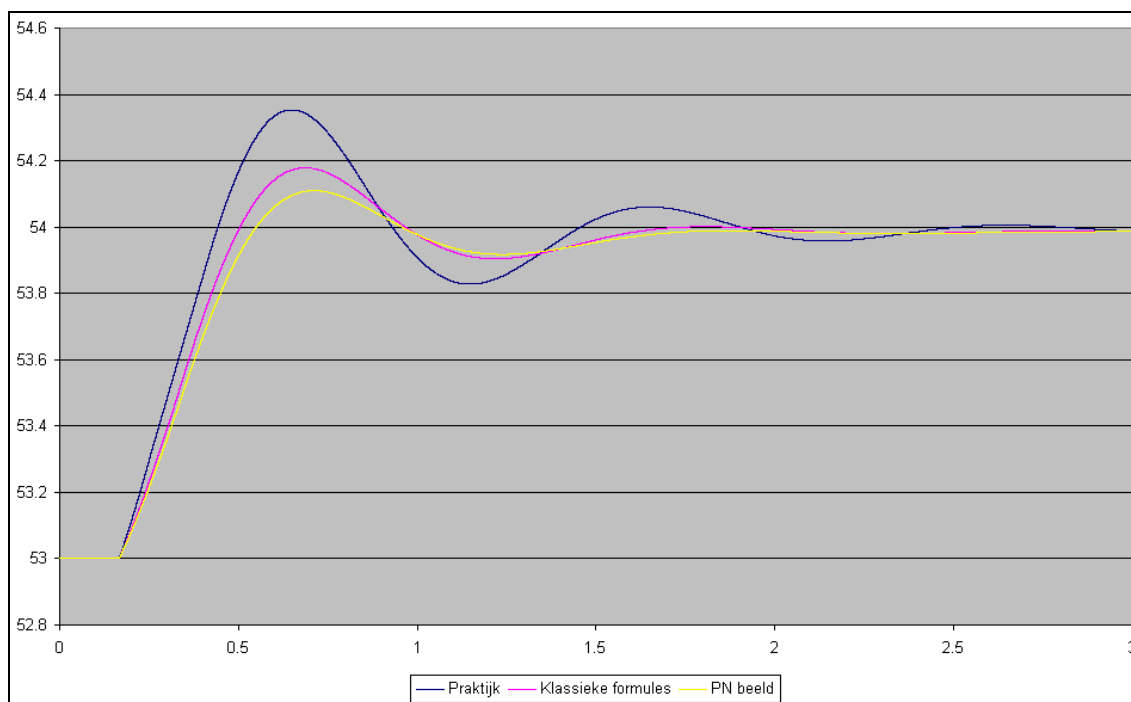
6.3.4 Vergelijking gevonden instellingen

Voor het verwarmen is op drie verschillende manieren gezocht naar de optimale instelling, om uiteindelijk een keuze te maken uit één van deze instellingen wordt een vergelijking gemaakt. Deze vergelijking gebeurt aan de hand van het, in de eisen opgenomen, overshoot, maar ook wordt gekeken naar de settling- en rise tijd.

Methode	Gain	Integratie tijd
Praktijk	89	2000s
Klassieke formules	77	2300s
Pn beeld	74	2500s

Tabel 16: verschillende instellingen verkregen met ontwerp methodieken

Wat meteen opvalt is het grote verschil van de gevonden instellingen en de huidige instelling (gain:1 en integratie tijd: 20s).



Figuur 29: vergelijking van de verschillende uitkomsten van de verwarming

Uit de vergelijking wordt het overschot bepaald, de rise tijd en de settling tijd. Bij de rise tijd wordt gekeken naar de tijd dat de stap van 0-100% gaat, vanaf het moment dat de stap gegeven wordt. Bij de settling tijd wordt gekeken wanneer de temperatuur binnen een afwijking van 10% blijft, vanaf het moment dat de stap gegeven wordt.

Methode	Overschot	Rise tijd (0-100%)	Settling tijd (10%)
Praktijk	35%	1593s	4736s
Klassieke formules	18%	1817s	3037s
Pn beeld	10%	1981s	1777s

Tabel 17: vergelijking verschillende methodes

Bij deze uitkomst van de vergelijking is duidelijk te zien wat voor deze toepassing de optimale instelling is, namelijk de instelling gevonden aan de hand van het ontwerpen met pn beeld. Deze heeft overschot wat aan de eisen voldoet en ondanks een iets langere rise tijd is de settling tijd aanzienlijk veel kleiner dan de andere methodes.

De optimale instellingen van de verwarming zijn als volgt:

Proportionele versterking	Integratie tijd (s)
74	2500

6.4 Regelen van de koeling

Het koelen van het bad gebeurt alleen bij het inbrengen van grote hoeveelheden thermische energie. Omdat dit gaat om korte periodes van elektrolytisch verchromen zal de temperatuur niet stabiel worden. Het regelen van de koeling wordt daarom niet, net als de regeling van de verwarming, helemaal uitgewerkt met stap responsies ed.. Juist omdat de temperatuur niet stabiel wordt tijdens het koelen is gekozen voor een proportionele regeling. Er is namelijk geen integrerende actie nodig om een statische fout weg te werken.

Omdat er (te) weinig koelcapaciteit beschikbaar is moet de koeling snel reageren op een temperatuur verhoging. Er wordt gesteld dat bij een halve graad afwijking de koeling volledig aan moet staan. Op deze manier kan de gain uitgerekend worden:

$$gain = \frac{100\%}{0.5} = 200$$

Omdat de koeling proportioneel geregeld wordt en gebruik gemaakt wordt van één regelaar moet de integrerende actie van de regelaar uitgeschakeld en gereset worden. Vervolgens wordt de integratie tijd op een grote waarde ($\approx$ oneindig) gezet, dit zorgt er voor dat de integrator niet gevuld wordt tijdens het koelen.

De instellingen tijdens het koelen zijn dus als volgt:

Proportionele versterking	Integratie tijd (s)
200	∞

6.5 Feed Forward

Een verdere verbetering wordt verwacht als er ook Feed Forward toegepast wordt. Feed Forward is bedoeld om op basis van verstoring direct een signaal aan de uitgang van de regelaar te geven. Er wordt in dit geval Feed Forward gegeven op basis van het vermogen wat gebruikt wordt om te verchromen. Omdat er gebruik gemaakt wordt van een split range regeling kan de Feed Forward zowel op de koeling als op de verwarming effect hebben, maar het verschil in vermogen tussen de koeling en de verwarming is aanzienlijk. Tijdens het ontwerpen van Feed Forward moet hier rekening mee gehouden worden.

Het doel van Feed Forward is dus de storing (warmte ontwikkelen bij het verchromen) te compenseren. Uit voorgaand onderzoek is gebleken dat ongeveer 85% van de benodigde energie van het verchromen omgezet wordt in warmte. Aan de hand hiervan kan de hoeveelheid ingebrachte thermische energie berekend worden.

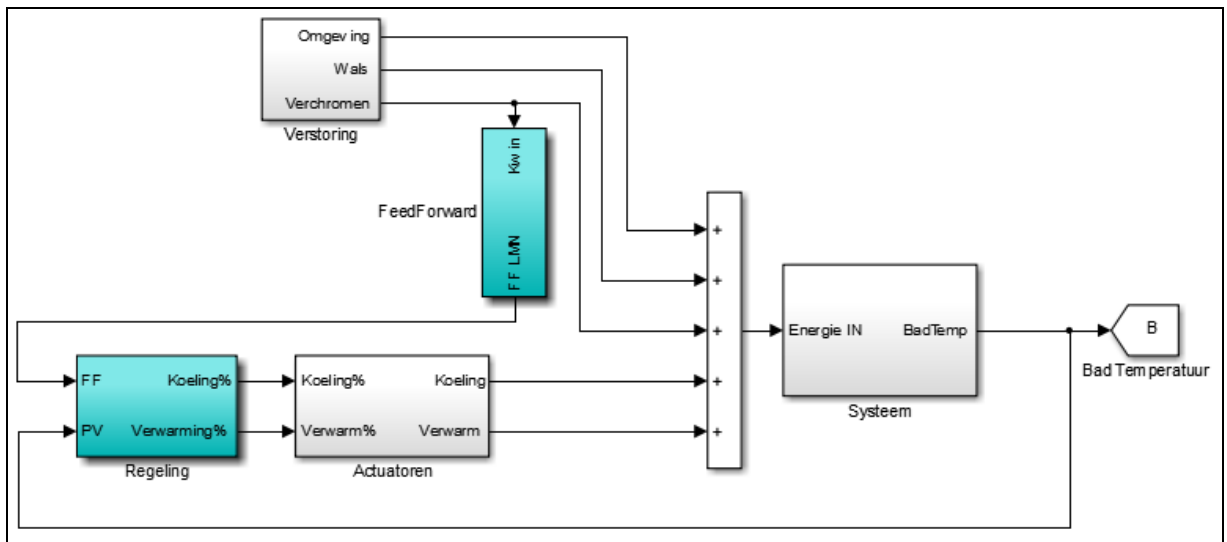
Voorbeeld:

De verwarming staat voor 50% bij, dit zorgt dus voor een warmte toevoer van 50kW. Vervolgens wordt er verchromd met een vermogen van 100kW, de warmte die hierbij ontstaat is 85kW. Deze 85kW moet dus gecompenseerd worden, enkel het dichtzetten van de verwarming compenseert 50kW. Er blijft dus nog 35kW over, dit betekent dat de

koeling $\frac{35}{40} \cdot 100\% = 87.5\%$ aan gaat om de complete warmte invoer van het verchromen te compenseren.

7. Modelleren nieuwe regeling in MATLAB Simulink

Het modelleren van de nieuwe regeling wordt in MATLAB Simulink gedaan. De ontworpen regeling kan op deze manier uitvoerig getest worden op het gevalideerde model. De gemodelleerde regeling is gebaseerd op de uitkomst van Hoofdstuk 6 Ontwerpen van een regeling.

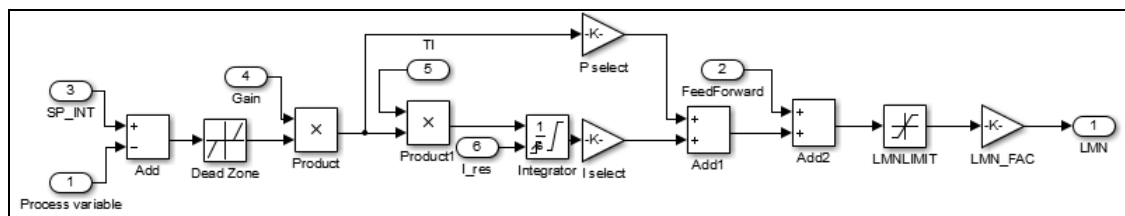


Figuur 30: model met nieuwe regeling

In dit hoofdstuk wordt de implementatie van de regeling en de Feed Forward behandeld (in blauw aangegeven). De andere subsystemen zijn behandeld in hoofdstuk 5. Voor meer informatie en de implementatie in MATLAB Simulink kan gekeken worden in Bijlage 1: Modelbeschrijving in detail.

Regeling

In het subsysteme Regeling wordt het aansturen van de koeling en verwarming geregeld. Dit wordt gedaan door een split range regelaar. Er is software gebruikt om te schakelen tussen de regelaar instellingen van de koeling en de verwarming, deze is beschreven in een PSD.



Figuur 31: PI regelaar in het nieuwe model

instellingen regelaar koelen/verwarmen	
Koelen	
JA	NEE
gain=GainKoelen	gain=GainVerwarmen
ti=tiKoelen	ti=tiVerwarmen
I_SEL=0	I_SEL=1
I_RES=1	I_RES=0

Figuur 32: beschrijving (PSD) implementatie nieuwe regeling

Feed Forward

In het subsysteem Feed Forward wordt bepaald hoeveel voorsturing gegeven moet worden om de warmte die vrijkomt bij het verchromen te compenseren. Dit wordt berekend aan de hand van de koel- en verwarmcapaciteit. Hoe dit gedaan wordt, wordt beschreven in een PSD.

Warmte=WarmteFactorElektrolyse*VermogenElektrolyse	
Warmte>(outputVerwarming*(MaxVerwarm/100%))	
JA	NEE
FFverwarming=-warmte/(MaxVerwarm/100%)	FF=-warmte/(MaxVerwarm/100%)
FFkoeling=(-warmte-FFverwarming)/(MaxKoel/100%)	
FFtotaal=FFverwarming+FFkoeling	

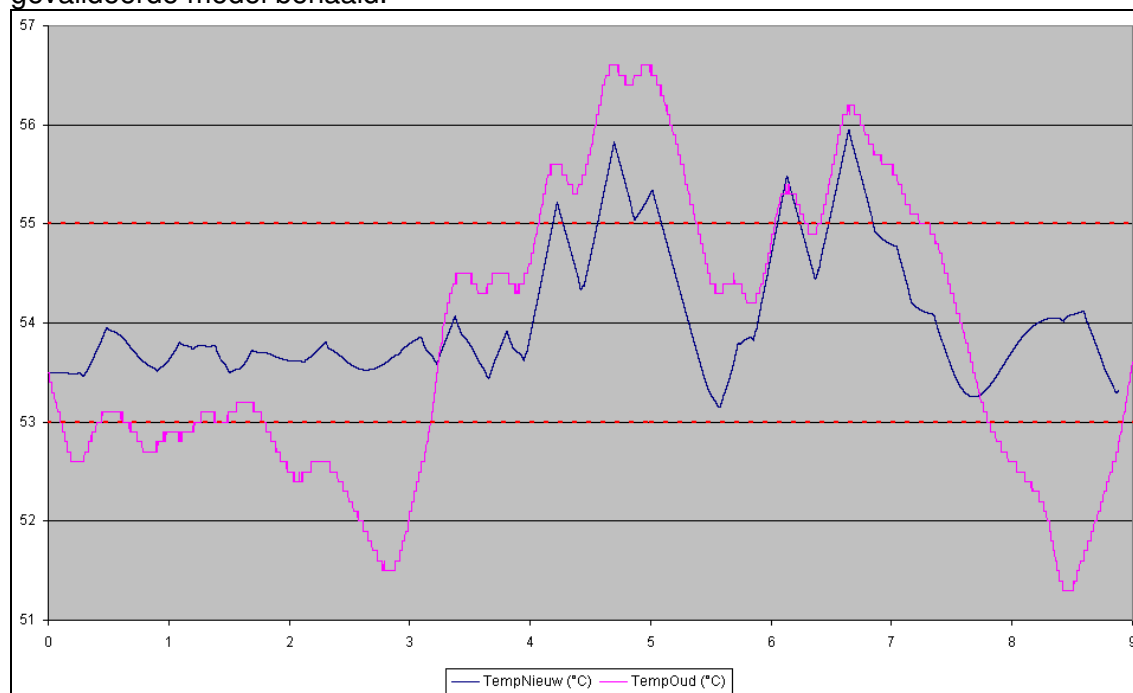
Figuur 33: beschrijving (PSD) implementatie Feed Forward

8. Resultaat

Voor een regeling is het niet alleen belangrijk hoe deze in een bepaalde situatie reageert. Het is ook belangrijk dat de regeling robuust is. Om de robuustheid te onderbouwen worden verschillende situaties die in de praktijk mogelijk zijn gesimuleerd.

Resultaat volgens valide model

Het volgende resultaat is over een productie tijd van 9 uur, aan de hand van het gevalideerde model behaald.



Figuur 34: vergelijking tussen de nieuwe en de oude regeling

Parameter	Oud	Nieuw
Minimale temperatuur (°C)	51,3°C	53,1°C
Maximale temperatuur (°C)	56,6°C	56,0°C
Tijd temperatuur te hoog (55+ °C)	147 minuten	72 minuten
Tijd temperatuur te laag (53- °C)	203 minuten	0 minuten
Totale tijd buiten bandbreedte	350 minuten	72 minuten

Tabel 18: resultaat behaald met het model

De tijd waarin de temperatuur van het bad buiten de gewenste bandbreedte is (te hoog of te laag), is bij de nieuwe regeling bijna vijf keer minder. Ook wijken de minimale en maximale temperaturen minder af van de gewenste temperatuur.

Door het minder vaak buiten de bandbreedte treden van de temperatuur zal de gemiddelde kwaliteit van de chroomlaag toenemen. Door de toenemende kwaliteit van de chroomlaag wordt de standtijd van de walsen langer. Een toenemende standtijd heeft als gevolg dat de walsen minder vaak verchroomd hoeven te worden.

Robuustheid

Onder robuustheid wordt verstaan: in hoeverre is de regeling bestand tegen (veranderende) storing van buitenaf. Om de robuustheid van de regeling aan te tonen worden verschillende parameters/omgevingscondities (zie Tabel 19: limieten van de regeling) gevarieerd en vervolgens gesimuleerd. De uitkomst van deze simulaties bepaald of de regeling nog functioneel is.

De limieten zijn gebaseerd op:

- Tijdens productie blijft de temperatuur tussen de 52.5°C en 56.5°C
- Zonder productie is de temperatuur stabiel op setpoint (54°C)
- Er wijkt maar één parameter per limiet bepaling af

Ook wordt gegeven wat er in de praktijk als limieten verwacht wordt. Deze zijn gebaseerd op de huidige installatie.

Parameter	Gevalideerd	Limieten	Praktijk
Omgevingstemperatuur	38°C	6°C - 43°C	35°C - 40°C
Omgevingsverliezen/isolatie	50kW	35kW - 100kW	40kW - 60kW
Koelvermogen	40kW	25kW - 120kW	30kW - 50kW
Verwarmingsvermogen	100kW	50kW - 180kW	80kW - 120kW
Dode tijd	600s	0s - 800s	500s - 700s
Warmtecapaciteit van het elektrolyt	75600 kJ/°C	64000 kJ/°C - 300000 kJ/°C	75000 kJ/°C - 78000 kJ/°C
Temperatuur van de walsen	35°C	0°C - 60°C	30°C - 60°C

Tabel 19: limieten van de regeling

Te zien is dat verwacht wordt dat de regeling in de verwachte limieten van de praktijk blijft functioneren. Het blijven functioneren bij (veranderende) storing van buitenaf geeft aan dat de regeling robuust is.

9. Aanbevelingen

Tijdens de uitvoer van het project blijkt dat er een aantal verbeteringen/modificaties mogelijk zijn. Deze worden hier benoemd omdat ze buiten de projectgrenzen vallen. Er valt nog winst te behalen betreffend de temperatuur regeling door:

- Toevoegen van een goede roering in het chroombad. Tijdens het project is duidelijk geworden dat de temperatuur in het bad zeker niet homogeen is en dat hierdoor een grote dode tijd ontstaat. Het toevoegen van roering vereenvoudigt het ontwerpen van een regeling, en heeft mogelijk een positief effect op de kwaliteit van de chroomlaag.
- Het tijdig schoonmaken/vervangen van de warmtewisselaars in het chroombad. Door vervuiling van de warmtewisselaars neemt het koelvermogen af, waardoor de koelcapaciteit in praktijk een aantal maal lager is dan berekend.
- Toevoegen van koelcapaciteit. Er is nu niet voldoende koelcapaciteit beschikbaar om overschot tegen te gaan. Door het toevoegen van koelcapaciteit kan de regeling verder verbeterd worden en de temperatuur stabiel gehouden worden. Hierdoor wordt het ook mogelijk om meerdere grote walsen achtereenvolgens te verchromen (momenteel ontstaan hierdoor hoge temperaturen).
- Voor het verchromen is de temperatuur van de wals niet duidelijk. In de data logging was dit duidelijk te zien. De regeling kan verder geoptimaliseerd worden als de temperatuur van de walsen bekend is.
- De temperatuur opnemer heeft een meetbereik van -200°C tot $+850^{\circ}\text{C}$, dit heeft een lage resolutie tot gevolg. Een opnemer met een bereik beter geschikt voor deze toepassing heeft een betere resolutie en maakt de regeling nauwkeuriger.

Bij het aanpassen van het systeem kan de regeling opnieuw geoptimaliseerd worden. Hieronder wordt per mogelijke aanpassing aan het systeem een passende aanpassing aan de regeling voorgesteld. Deze aanpassingen leveren optimalisatie aan de nieuwe situatie op, echter blijft de regeling functioneren zolang binnen de limieten gewerkt wordt.

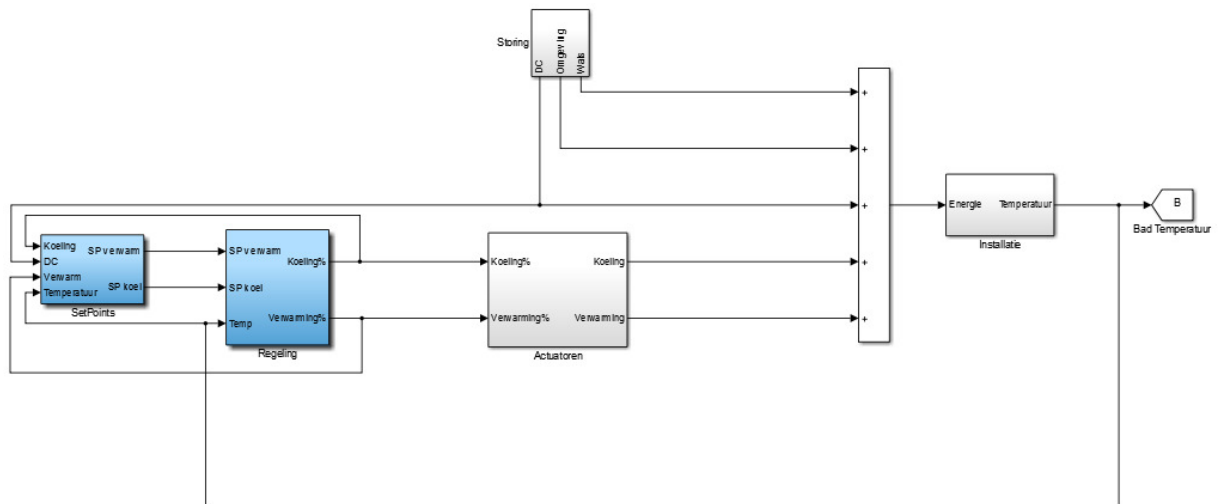
Parameter	Aanpassing regeling
Omgevingstemperatuur	Geen optimalisatie nodig.
Omgevingsverliezen/isolatie	Geen optimalisatie nodig.
Koelcapaciteit	Aanpassen van gain tijdens koelen met dezelfde factor als de koelcapaciteit is veranderd. Feed Forward aanpassen aan de koelcapaciteit.
Verwarmingscapaciteit	Aanpassen van gain tijdens verwarmen met dezelfde factor als de verwarmingscapaciteit is veranderd. Feed Forward aanpassen aan de verwarmingscapaciteit.
Dode tijd	Verwarming (gain & integratietijd) optimaliseren.
Warmtecapaciteit van het elektrolyt	Geen optimalisatie nodig.
Temperatuur van de walsen	Geen optimalisatie nodig.

10. Literatuurlijst

1. "Conductive Heat Transfer", geraadpleegd op: 7 april 2014, http://www.engineeringtoolbox.com/conductive-heat-transfer-d_428.html
2. "Convective Heat Transfer", geraadpleegd op: 4 april 2014, http://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d_430.html
3. "Elektrolyse", geraadpleegd op : 3 maart 2014, <http://nl.wikipedia.org/wiki/Elektrolyse>
4. "Galvaniseren", geraadpleegd op: 3 maart 2014, <http://nl.wikipedia.org/wiki/Galvaniseren>
5. Kimmenaede, A.J.M. van (2001). *Warmteleer voor technici*. Groningen: Wolters-Noordhoff.
6. Ouwehand, J., Papa, T.J.G., Post, E., & Taal, A.C. (2001). *Toegepaste Energietechniek*. Schoonhoven: Academic Service.
7. "PIDTuningClassical", geraadpleegd op: 16 mei 2014, <https://controls.engin.umich.edu/wiki/index.php/PIDTuningClassical>
8. Schrage, J., Daal, H. van, & Stroeken, J. (2005). *Regeltechniek voor HTO*. Baarn: HBuitgevers
9. Smith, C.A. & Corripio, A.B. (1997). *Principles and practice of automatic process control*. New York: John Wiley & Sons, inc.
10. "Soortelijke warmte", geraadpleegd op: 17 maart 2014, http://nl.wikipedia.org/wiki/Soortelijke_warmte
11. "Wat is de thermische massa?", geraadpleegd op: 10 maart 2014, <http://www.passiefhuisplatform.be/faq/wat-de-thermische-massa>

Bijlage 1: Modelbeschrijving in detail

Hier wordt het gemaakte model met huidige regeling en nieuwe regeling uitgebreid beschreven. Er wordt begonnen met de niet beïnvloedbare delen van het model (actuators, storing en installatie). Dan wordt de huidige regeling, die gemodelleerd is, beschreven. En vervolgens de eigen ontworpen regeling. Om dit document goed te begrijpen is enige kennis van MATLAB Simulink benodigd.

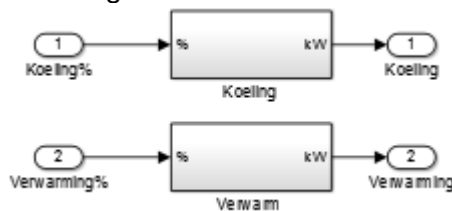


Figuur 35: totaalschema model met huidige regeling

1.1 Niet beïnvloedbaar

Actuators

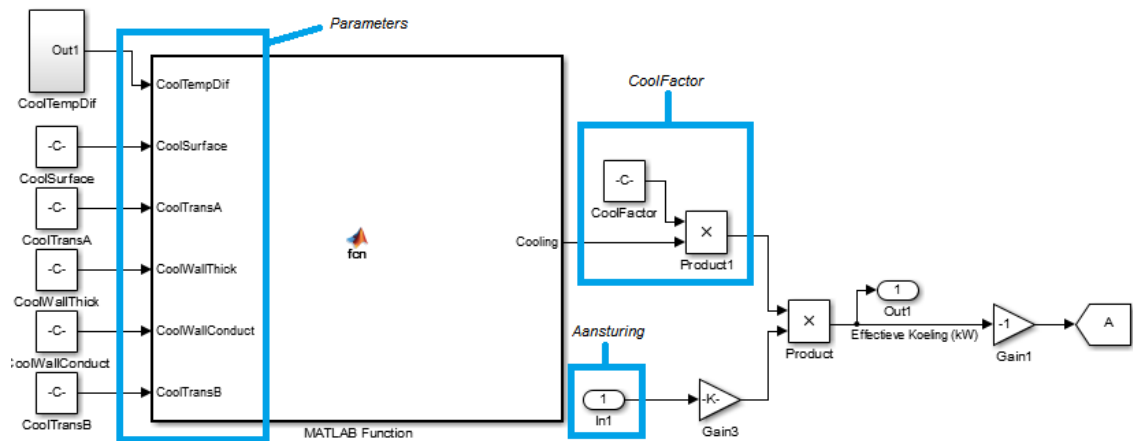
De actuators zijn de middelen waarmee de temperatuur geregeld kan worden. In dit geval de koeling en de verwarming.



Figuur 36: actuators

Koeling

De koeling bestaat uit een MATLAB programma waarmee aan de hand van de parameters van de koeling, de koelcapaciteit berekend wordt. Vervolgens wordt het verschil tussen theorie en praktijk gecompenseerd door de CoolFactor. De aansturing geeft aan hoe ver de klep van de koeling open staat



Figuur 37: koeling

```
function Cooling = fcn(CoolTempDif, CoolSurface, CoolTransA, CoolWallThick,
CoolWallConduct, CoolTransB)
%#codegen

U=1/((1/CoolTransA)+(CoolWallThick/CoolWallConduct)+(1/CoolTransB));
%warmtedoorgangscoefficient

Cooling=U*CoolSurface*CoolTempDif/-1000; %actieve koeling in kW
```

Variabele	Beschrijving	Eenheid
Cooling	Koel vermogen	kW
CoolTempDif	Gemiddelde temperatuurverschil van de warmtewisselaar en het elektrolyt	K
CoolSurface	Oppervlakte van de warmtewisselaar	m ²
CoolTransA	Warmteoverdrachtscoëfficiënt bij medium A	W/(m ² *K)
CoolWallThick	Wanddikte van de warmtewisselaar	m
CoolWallConduct	Warmtegeleidingscoëfficiënt van wandmateriaal	W/(m*K)
CoolTransB	Warmteoverdrachtscoëfficiënt bij medium B	W/(m ² *K)

Tabel 20: variabelen met beschrijving en eenheid

De TempDif is het gemiddelde verschil in temperatuur van de warmtewisselaar en het elektrolyt. Deze wordt gebruikt voor het berekenen van het koel/verwarm vermogen en varieert aan de hand van de temperatuur van het elektrolyt.

$$\Delta T_{\text{In}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

Verwarming

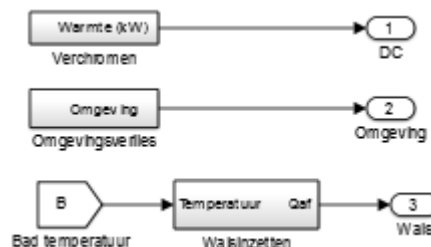
Omdat het verwarmen met eenzelfde soort warmtewisselaar gebeurt is hiervoor hetzelfde systeem gebruikt, maar met andere parameters, namelijk:

Variabele	Beschrijving	Eenheid
Heating	Verwarming vermogen	kW
HeatTempDif	Gemiddelde temperatuurverschil van de warmtewisselaar en het elektrolyt	K
HeatSurface	Oppervlakte van de warmtewisselaar	m ²
HeatTransA	Warmteoverdrachtscoëfficiënt bij medium A	W/(m ² *K)
HeatWallThick	Wanddikte van de warmtewisselaar	m
HeatWallConduct	Warmtegeleidingscoëfficiënt van wandmateriaal	W/(m*K)
HeatTransB	Warmteoverdrachtscoëfficiënt bij medium B	W/(m ² *K)

Tabel 21: variabelen met beschrijving en eenheid

Storing

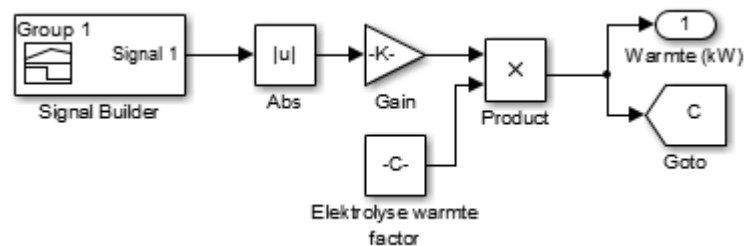
Onder storing verstaan we de invloeden op de temperatuur van het chroombad die niet regelbaar zijn. In dit systeem zijn er drie storingen, namelijk: verchromen, omgeving en het wisselen van wals.



Figuur 38: storing

Verchromen

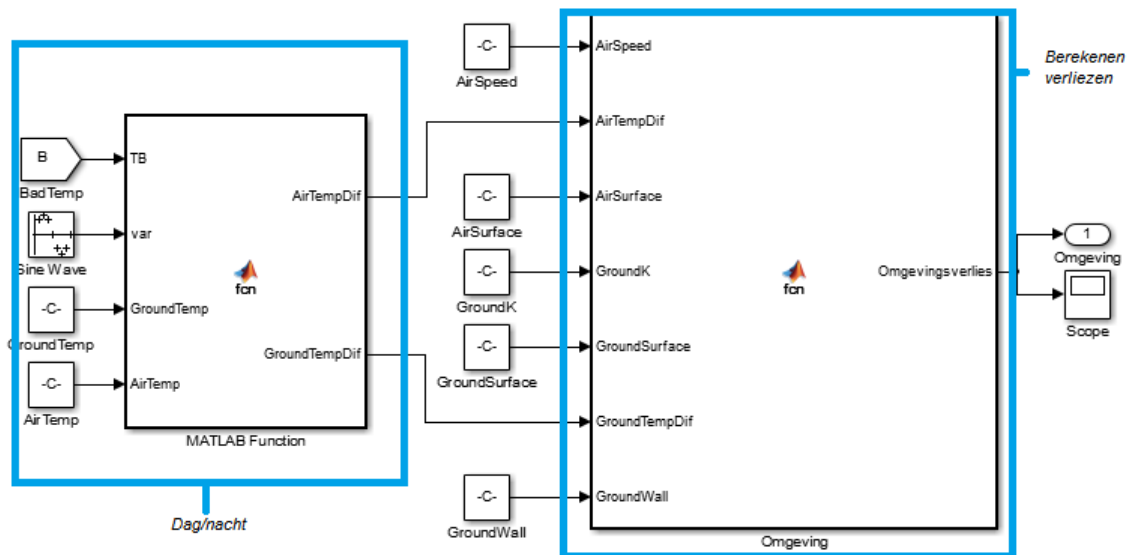
Het verchromen gebeurt aan de hand van een via data logging verkregen signaal. Dit signaal is verwerkt in de Signal Builder. Dit signaal geeft aan de hand van de Elektrolyse warmte factor een bepaalde hoeveelheid thermische energie.



Figuur 39: verchromen

Omgeving

De thermische verliezen veroorzaakt door de omgeving worden gemodelleerd aan de hand van twee MATLAB programma's. Het eerste programma is voor het variëren van temperatuur in de dag en nacht. Aan de hand van het verschil in temperatuur van het elektrolyt en de omgeving ontstaat een thermisch verlies. Dit thermische verlies wordt berekend in het tweede MATLAB programma.



Figuur 40: omgeving

```
function [AirTempDif, GroundTempDif] = fcn(TB, var, GroundTemp, AirTemp)
%#codegen

AirTempDif=TB-(AirTemp-var); %verschil temperatuurbad en luchttemperatuur
GroundTempDif=TB-(GroundTemp-var); %verschil temperatuurbad en
grondtemperatuur
```

Variabele	Beschrijving	Eenheid
AirTempDif	Verschil in temperatuur tussen elektrolyt en lucht	°C
GroundTempDif	Verschil in temperatuur tussen elektrolyt en grond	°C
TB	Temperatuur van het elektrolyt	°C
Var	Variatie in de temperatuur (dag/nacht)	°C
GroundTemp	Temperatuur van de grond	°C
AirTemp	Temperatuur van de lucht	°C

Tabel 22: variabelen met beschrijving en eenheid

```
function Omgevingsverlies=fcn(AirSpeed, AirTempDif, AirSurface, GroundK,
GroundSurface, GroundTempDif, GroundWall)
%#codegen

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%AirLoss%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
hc=10.45-AirSpeed+10*AirSpeed^0.5; %convectie warmte overdracht coëfficiënt
[W/m²K]
Q=hc*AirSurface*AirTempDif; %warmte overdracht per tijdseenheid [W]

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%GroundLoss%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
q=GroundK*GroundSurface*GroundTempDif/GroundWall; %warmte overdracht per
tijdseenheid [W]

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%TotalLoss%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Omgevingsverlies=(Q+q)*-0.001; %omrekenen naar kW en negatief maken (verlies)
```

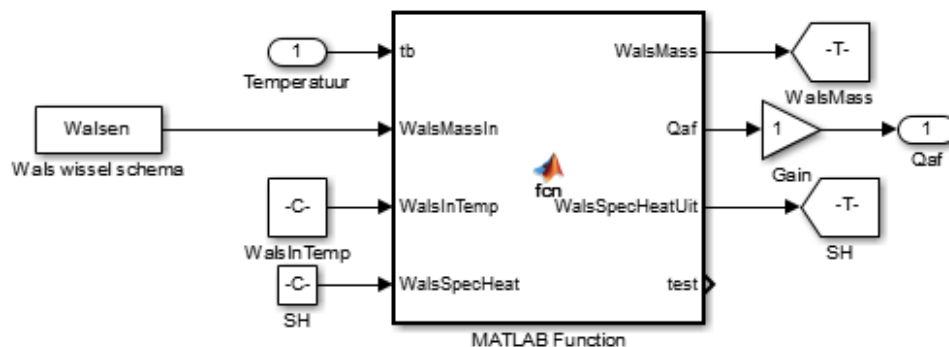
Variabele	Beschrijving	Eenheid
Omgevingsverlies	Totale omgevingsverlies	kW
AirSpeed	Snelheid van de lucht aan bovenzijde tank	m/s
AirTempDif	Verschil in temperatuur tussen elektrolyt en lucht	°C
AirSurface	Oppervlakte van open bovenkant tank	m²

GroundK	Thermische geleidbaarheid wand	W/(m*K)
GroundSurface	Oppervlakte wand	m ²
GroundTempDif	Vershil in temperatuur tussen elektrolyt en grond	°C
GroundWall	Dikte wand	m

Tabel 23: variabelen met beschrijving en eenheid

Wisselen van wals

Uit de data logging is niet bekend welke walsen verchromd worden op welk tijdstip. De walsen zijn daarom, aan de hand van de stromen die gebruikt worden bij het verchromen, geschat. Het wals wissel schema wordt via Excel ingevoerd. Aan de hand van de massa en de begin temperatuur van de wals neemt de wals energie op. Dit wordt berekend aan de hand van het MATLAB programma.



Figuur 41: wals wisselen

```
function [WalsMass, Qaf, WalsSpecHeatUit, test] = fcn(tb, WalsMassIn,
WalsInTemp, WalsSpecHeat)
%#codegen

persistent tw
persistent QWals
persistent OldWalsMass

if isempty (OldWalsMass)
    OldWalsMass=0;
end

if isempty (QWals)
    QWals=WalsMassIn*WalsSpecHeat*WalsInTemp;
end

tw=QWals/(WalsSpecHeat*WalsMassIn); %Temp v/d wals

if (WalsMassIn ~= OldWalsMass) %Als de mass veranderd, ofwel wals wordt
uitgehaald of ingezet
    QWals=WalsMassIn*WalsSpecHeat*WalsInTemp; %dan wordt nieuwe QWals bepaald.
    tw=WalsInTemp; %en temperatuur van de wals wordt naar begintemp gezet.
end

OldWalsMass=WalsMassIn;

Qaf=0;
dT=tb-tw; %delta Temperatuur van bad en wals

if (WalsMassIn>0) %Als walsMass>0, ofwel zit een wals in het chroombad
    Qaf=4*500*dT/-1000; %Qaf wordt bepaald
end

QWals=QWals-Qaf; %De nieuwe QWals, energie opgenomen door wals = Qaf;
```

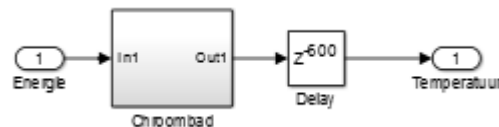
```
test=QWals;
WalsMass=WalsMassIn;
WalsSpecHeatUit=WalsSpecHeat;
```

Variabele	Beschrijving	Eenheid
WalsMass	Massa van de wals in de tank	kg
Qaf	Energie opgenomen door wals	kW
WalsSpecHeatUit	Specifieke warmtecapaciteit van de wals	J/(g*K)
tb	Temperatuur elektrolyt	°C
WalsMassIn	Massa van de wals die ingevoerd wordt	kg
WalsInTemp	Temperatuur van de wals bij invoeren in bad	°C
WalsSpecHeat	Specifieke warmtecapaciteit van de wals	J/(g*K)

Tabel 24: variabelen met beschrijving en eenheid

Installatie

De installatie is het chroombad met elektrolyt zelf. Dit werkt als een thermisch buffer waar energie aan toegevoegd wordt of energie van onttrokken wordt. De energie die toegevoerd of onttrokken wordt is in feite een optelling van de invloeden op de temperatuur (koeling, verwarming, omgeving, wals wisselen en verchromen). De energie wordt omgerekend naar een temperatuur verandering. Het wisselen van een wals is ook verwerkt in het MATLAB programma.



Figuur 42: installatie

```
function Temp = fcn(EnergyIn, AcidMass, AcidStartTemp, AcidSpecHeat, WalsMass,
WalsSpecHeat)
%#codegen

persistent Q
persistent OldWalsMass
persistent OldTemp

if isempty(OldTemp) %initialisatie
    OldTemp=AcidStartTemp;
end

if isempty(OldWalsMass) %initialisatie
    OldWalsMass=0;
end

if isempty(Q) %initalisatie (energie bij start)
    Q=AcidMass*AcidSpecHeat*AcidStartTemp;
end

if (WalsMass>OldWalsMass) %Wals wordt ingezet
    Q=Q+WalsMass*WalsSpecHeat*OldTemp; %Q wordt Q+Qwals
    OldWalsMass=WalsMass; %voor herkennen wals uithalen
end

if (WalsMass<OldWalsMass) %Wals wordt uitgethaald
    Q=Q-OldWalsMass*WalsSpecHeat*OldTemp; %Q wordt Q-Qwals
    OldWalsMass=WalsMass; %voor herkennen wals inzetten
end

Q=Q+EnergyIn; %Q wordt Q+ toegevoerde energie
GemSH= ((AcidMass*AcidSpecHeat)+(WalsMass*WalsSpecHeat))/(AcidMass+WalsMass);
%gemiddelde Specific Heat (met wals)
```

```

TotalMass=AcidMass+WalsMass; %totale massa van elektrolyt en wals
Temp=(Q)/(GemSH*TotalMass); %temperatuur bad
OldTemp=Temp;

```

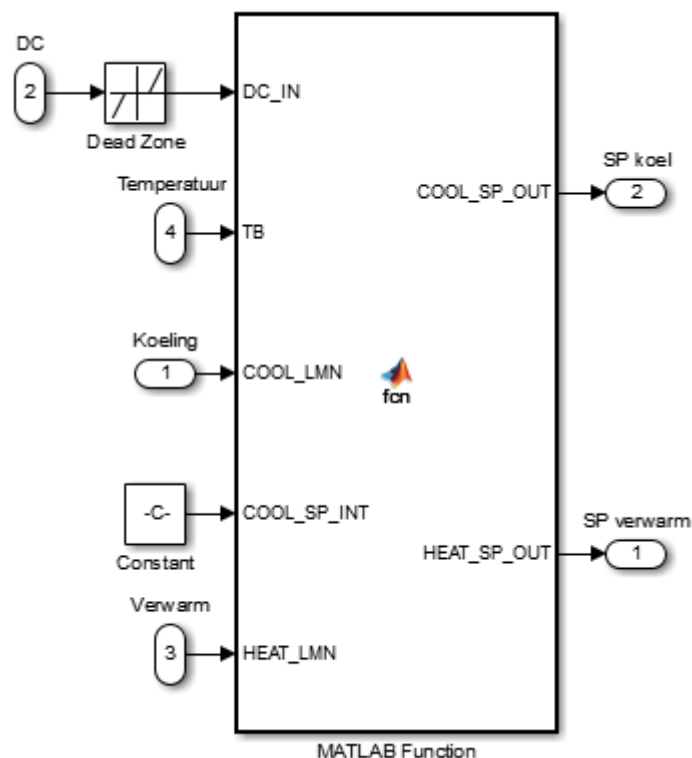
Variabele	Beschrijving	Eenheid
Temp	Temperatuur van het elektrolyt	°C
EnergyIn	Energie die wordt toegevoegd per tijdseenheid aan elektrolyt	kW
AcidMass	Massa elektrolyt	kg
AcidStartTemp	Begintemperatuur elektrolyt	°C
AcidSpecHeat	Specifieke warmtecapaciteit elektrolyt	J/(g*K)
WalsMass	Massa wals in het bad	kg
WalsSpecHeat	Specifieke warmtecapaciteit wals	J/(g*K)

Tabel 25: variabelen met beschrijving en eenheid

1.2 Huidige regeling

SetPoints

Er wordt gebruik gemaakt van twee PI-regelaars die doormiddel van veranderende SetPoints aangestuurd worden. Om de huidige regeling te Simuleren is deze aan de hand van het PLC programma gemodelleerd. Het veranderen van de SetPoints gebeurt met een MATLAB programma.



Figuur 43: regelen met SetPoints

```

function [COOL_SP_OUT, HEAT_SP_OUT] = fcn(DC_IN, TB, COOL_LMN, COOL_SP_INT,
HEAT_LMN)
%#codegen

persistent HEAT_CHRM

```

```

if isempty (HEAT_CHRM)
    HEAT_CHRM=0;
end

HEAT_ON=COOL_SP_INT-1; %één graad onder SP

if ((COOL_SP_INT > TB) && (COOL_LMN < 10)) %Temperatuur onder setpoint en
koeling <10%
    HEAT_CHRM=1; %HEAT_CHRM -> verwarmen
end

if ((COOL_SP_INT < TB) && (HEAT_LMN < 80)) %Temperatuur boven setpoint en
verwarming <80%
    HEAT_CHRM=0; %verwarming uit
end

if ((TB > HEAT_ON) && (DC_IN)) %als temperatuur hoger is dan (SP-1) en wordt
verchroomd
    HEAT_CHRM=0; %verwarming uit
end

if (HEAT_CHRM) %als verwarming aan
    COOL_SP_OUT=100; %SP koeling op 100 graden
    HEAT_SP_OUT=COOL_SP_INT-1.5; %instellen SP verwarmen
elseif (HEAT_CHRM==0) %als verwarming uit
    COOL_SP_OUT=COOL_SP_INT; %instellen SP koelen
    HEAT_SP_OUT=0; %SP verwarming op 0 graden
else %anders
    COOL_SP_OUT=100; %koeling uit
    HEAT_SP_OUT=0; %verwarming uit
end

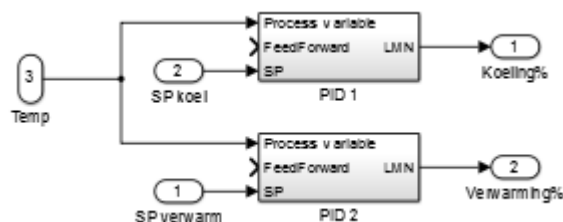
```

Variabele	Beschrijving	Eenheid
COOL_SP_OUT	Setpoint koeling naar PI regelaar	°C
HEAT_SP_OUT	Setpoint verwarming naar PI regelaar	°C
DC_IN	Vermogen van het verchromen	kW
TB	Temperatuur van het elektrolyt	°C
COOL_LMN	Aansturing koeling vanuit PI regelaar	%
COOL_SP_INT	Ingestelde setpoint van de koeling	°C
HEAT_LMN	Aansturing verwarming vanuit PI regelaar	%

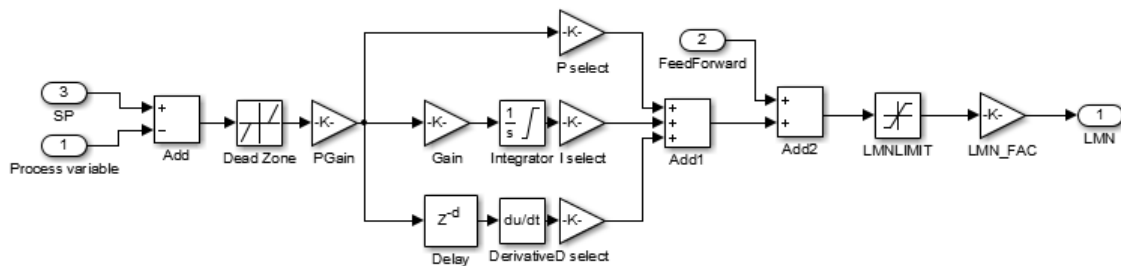
Tabel 26: variabelen met beschrijving en eenheid

Regeling

De twee PI-regelaars, deze regelaars zijn gemodelleerd naar de regelaar aanwezig in de S7 PLC. De documentatie voor deze regelaar is terug te vinden in Bijlage 2: Siemens S7 PID documentatie. De instellingen van deze PI-regelaars worden via Excel ingevoerd, zodat deze makkelijk aanpasbaar en overzichtelijk zijn.



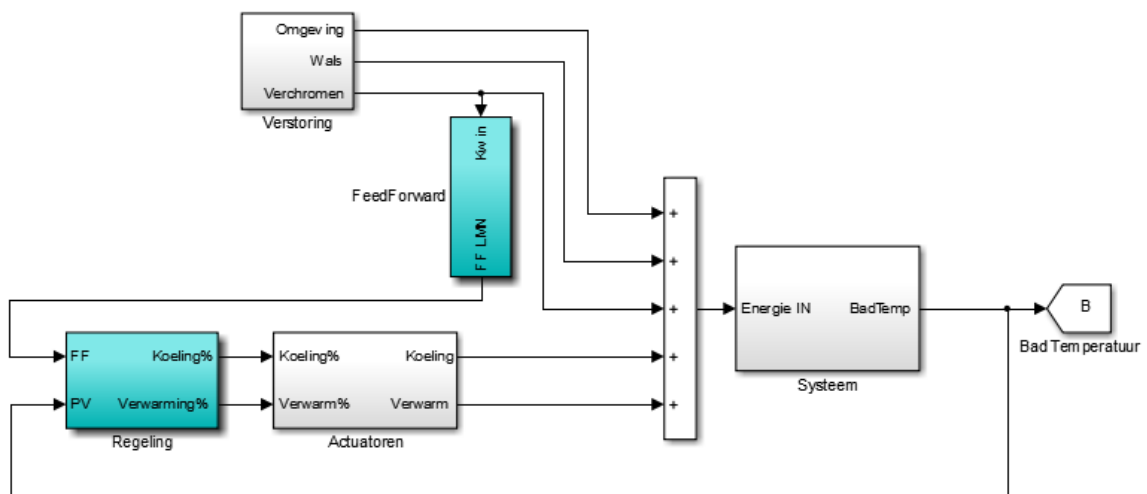
Figuur 44: regeling met PI voor koelen en verwarmen



Figuur 45: gemodelleerde PID regelaar

1.3 Nieuwe regeling

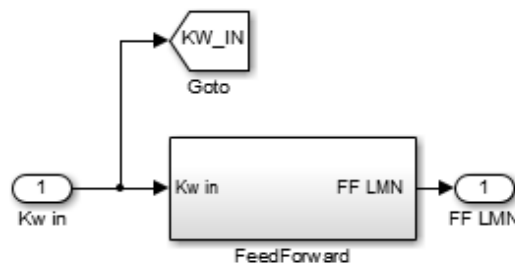
Voor het ontwerpen van een nieuwe regeling is gebruik gemaakt van het gevalideerde model met verstoring, actuatoren en het systeem. De in blauw aangegeven subsystemen vormen de regeling. Dit bestaat uit Feed Forward en Regeling. Deze worden hieronder per stuk behandeld.



Figuur 46: totaalschema model met nieuwe regeling

FeedForward

In het subsysteem Feed Forward wordt een Feed Forward gegenereerd om de warmte die vrijkomt bij het verchromen te compenseren. Dit gebeurt met een berekening verwerkt in software. Dit op basis van de uitgang van de regelaar en het vermogen wat gebruikt wordt om te verchromen.



Figuur 47: schema Feed Forward

```

function FF = fcn(KW, LMN)
%#codegen

warmte=0.85*KW; %warmte tijdens verchromen

if(warmte>LMN) %meer warmte ingebracht dan er wordt verwarmd
    FFw=LMN; %verwarming uit met FF
    FFk=(warmte-LMN)/0.4; %FF op koelen
    FF=-FFw-FFk; %totale FF
else
    FF=-warmte; %verwarming gedeeltelijk uit door FF
end

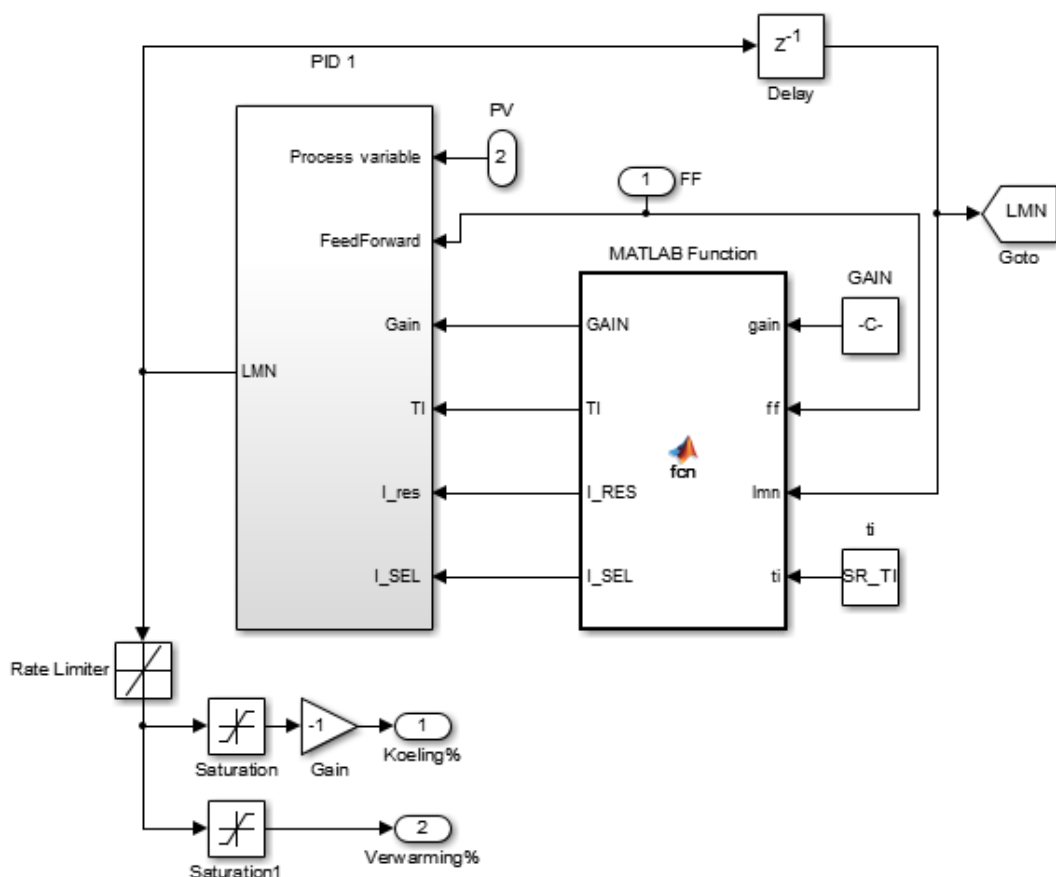
```

Variabele	Beschrijving	Eenheid
FF	Feed Forward naar PI regelaar	%
KW	Vermogen voor het verchromen	kW
LMN	Uitgang PI regelaar zonder Feed Forward	%

Tabel 27: variabelen met beschrijving en eenheid

Regeling

Voor het regelen van de temperatuur wordt gebruik gemaakt van één (split range) PI-regelaar, software voor het wisselen van instellingen en het resetten en selecteren van de integrerende actie van de regelaar. Er is een rate limiter toegepast om te voorkomen dat er stap-vormige aansturing op de actuators komt. De uitgang van de regelaar wordt gesplitst in een aansturing van de koeling en een aansturing van de verwarming.



Figuur 48: nieuwe regeling

```

function [GAIN, TI, I_RES, I_SEL] = fcn(gain, ff, lmn, ti)
%#codegen

if ((lmn+ff)<0) %als de regelaar de koeling aanstuurt
    GAIN=200; %gain verhogen naar 200
    TI=0; %1/ti, ti wordt oneindig
    I_SEL=0; %integrerende actie uit
    I_RES=1; %integrator reseten
else %anders instellingen verwarmen
    GAIN=gain;
    TI=1/ti;
    I_SEL=1; %integrerende actie weer aan
    I_RES=0;
end

```

Variabele	Beschrijving	Eenheid
GAIN	Versterking PI regelaar	-
TI	1/ (integratietijd)	1/s
I_RES	Integrator reset	-
I_SEL	Integrator select	-
gain	Versterking van verwarming	-
ff	Feed Forward	%
lmn	Uitgang van PI regelaar zonder Feed Forward	%
ti	Integratietijd van de verwarming	s

Tabel 28: variabelen met beschrijving en eenheid

Bijlage 2: Siemens S7 PID documentatie

27 SFBs for Integrated Control

27.1 Continuous Control with SFB 41/FB 41 "CONT_C"

Introduction

SFB/FB "CONT_C" (continuous controller) is used on SIMATIC S7 programmable logic controllers to control technical processes with continuous input and output variables. During parameter assignment, you can activate or deactivate sub-functions of the PID controller to adapt the controller to the process. You can assign this easily by using the parameter assignment tool (Menu path: **Start > Simatic > Step7 > Assign PID Control parameters**). The online electronic manual is found under **Start > Simatic > Step7 > Assign PID Control English**.

Application

You can use the controller as a PID fixed setpoint controller or in multi-loop controls as a cascade, blending or ratio controller. The functions of the controller are based on the PID control algorithm of the sampling controller with an analog signal, if necessary extended by including a pulse generator stage to generate pulse duration modulated output signals for two or three step controllers with proportional actuators.

Note

The calculation of the values in the control blocks is only correct if the block is called at regular intervals. For this reason, you should call the control blocks in a cyclic interrupt OB (OB30 to OB38). Enter the sampling time in the CYCLE parameter.

Description

Apart from the functions in the setpoint and process value branches, the SFB/FB implements a complete PID controller with continuous manipulated variable output and the option of influencing the manipulated value manually.

In the following, you will find a detailed description of the sub-functions:

Setpoint Branch

The setpoint is entered in floating-point format at the **SP_INT** input.

Process Variable Branch

The process variable can be input in the peripheral (I/O) or floating-point format. The CRP_IN function converts the PV_PER peripheral value to a floating-point format of -100 to +100 % according to the following formula:

$$\text{Output of CRP_IN} = \text{PV_PER} * \frac{100}{27648}$$

The PV_NORM function normalizes the output of CRP_IN according to the following formula:

$$\text{Output of PV_NORM} = (\text{output of CRP_IN}) * \text{PV_FAC} + \text{PV_OFF}$$

PV_FAC has a default of 1 and PV_OFF a default of 0.

Error Signal

The difference between the setpoint and process variable is the error signal. To suppress a small constant oscillation due to the manipulated variable quantization (for example, in pulse duration modulation with PULSEGEN), a dead band is applied to the error signal (DEADBAND). If DEADB_W = 0, the dead band is switched off.

PID Algorithm

The PID algorithm operates as a position algorithm. The proportional, integral (INT), and derivative (DIF) actions are connected in parallel and can be activated or deactivated individually. This allows P, PI, PD, and PID controllers to be configured. Pure I and D controllers are also possible.

Manual Value

It is possible to switch over between a manual and an automatic mode. In the manual mode, the manipulated variable is corrected to a manually selected value. The integrator (INT) is set internally to LMN - LMN_P - DISV and the derivative unit (DIF) to 0 and matched internally. This means that a switchover to the automatic mode does not cause any sudden change in the manipulated value.

Manipulated Value

The manipulated value can be limited to a selected value using the LMNLIMIT function. Signaling bits indicate when a limit is exceeded by the input variable. The LMN_NORM function normalizes the output of LMNLIMIT according to the following formula:

$$\text{LMN} = (\text{output of LMNLIMIT}) * \text{LMN_FAC} + \text{LMN_OFF}$$

LMN_FAC has the default 1 and LMN_OFF the default 0.

The manipulated value is also available in the peripheral format. The CPR_OUT function converts the floating-point value LMN to a peripheral value according to the following formula:

$$\text{LMN_PER} = \text{LMN} * \frac{27648}{100}$$

Feed Forward Control

A disturbance variable can be fed forward at the DISV input.

Initialization

SFB 41 "CONT_C" has an initialization routine that is run through when the input parameter COM_RST = TRUE is set.

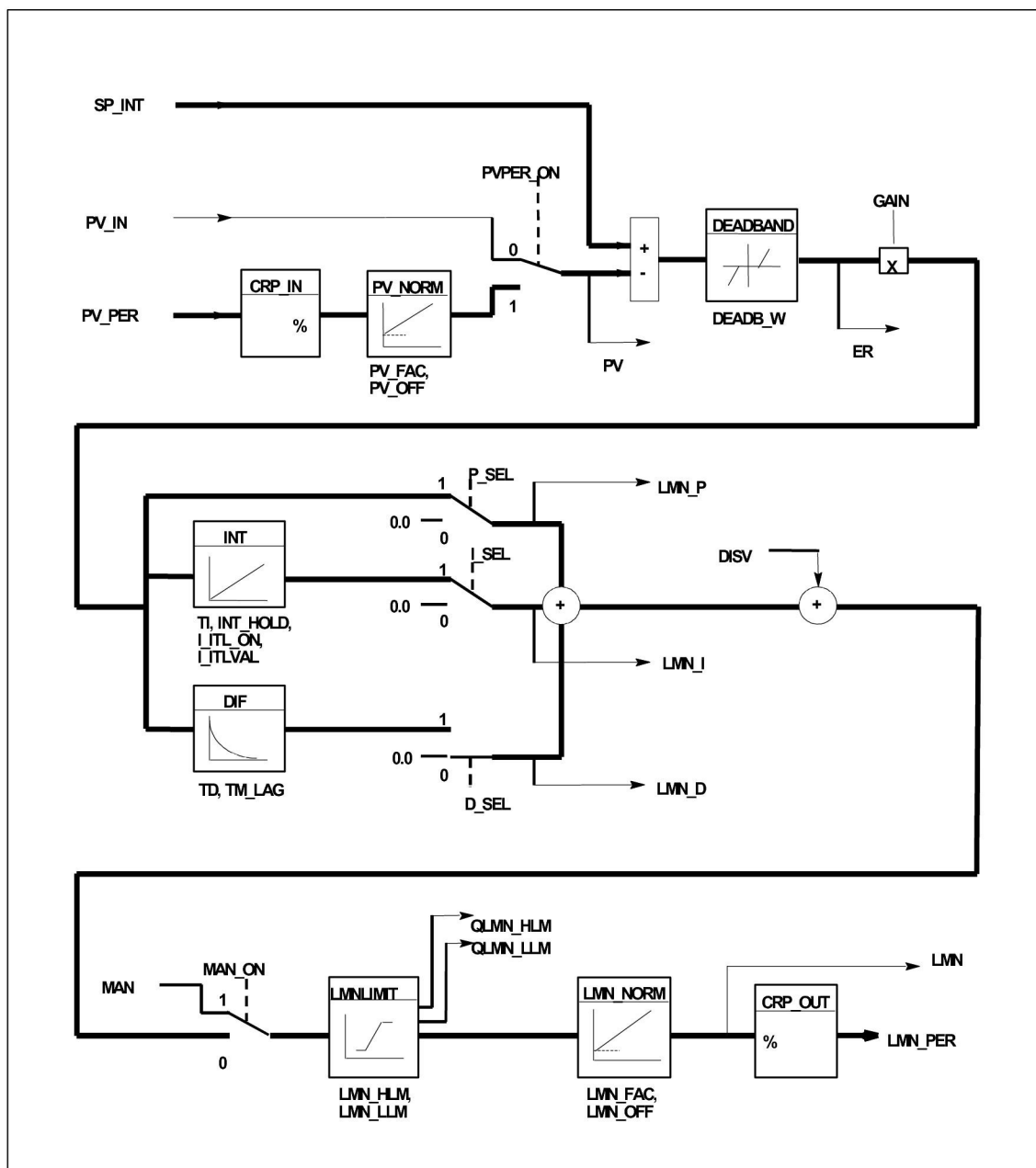
During initialization, the integrator is set internally to the initialization value I_ITVAL. When it is called in a cyclic interrupt priority class, it then continues to work starting at this value.

All other outputs are set to their default values.

Error Information

The error output parameter RET_VAL is not used.

CONT_C Block Diagram



Input Parameters

The following table contains the description of the input parameters for SFB 41/FB 41 "CONT_C."

Parameter	Data Type	Range of Values	Default	Description
COM_RST	BOOL		FALSE	COMPLETE RESTART The block has an initialization routine that is processed when the input COM_RST is set.
MAN_ON	BOOL		TRUE	MANUAL VALUE ON If the input "manual value on" is set, the control loop is interrupted. A manual value is set as the manipulated value.
PVPER_ON	BOOL		FALSE	PROCESS VARIABLE PERIPHERAL ON If the process variable is read from the I/Os, the input PV_PER must be connected to the I/Os and the input "process variable peripheral on" must be set.
P_SEL	BOOL		TRUE	PROPORTIONAL ACTION ON The PID actions can be activated or deactivated individually in the PID algorithm. The P action is on when the input "proportional action on" is set.
I_SEL	BOOL		TRUE	INTEGRAL ACTION ON The PID actions can be activated or deactivated individually in the PID algorithm. The I action is on when the input "integral action on" is set.
INT_HOLD	BOOL		FALSE	INTEGRAL ACTION HOLD The output of the integrator can be "frozen" by setting the input "integral action hold."
I_ITL_ON	BOOL		FALSE	INITIALIZATION OF THE INTEGRAL ACTION ON The output of the integrator can be connected to the input I_ITL_VAL by setting the input "initialization of the integral action on."
D_SEL	BOOL		FALSE	DERIVATIVE ACTION ON The PID actions can be activated or deactivated individually in the PID algorithm. The D action is on when the input "derivative action on" is set.
CYCLE	TIME	≥ 1 ms	T#1s	SAMPLING TIME The time between the block calls must be constant. The "sampling time" input specifies the time between block calls.
SP_INT	REAL	-100.0 to +100.0 (%) or phys. value 1)	0.0	INTERNAL SETPOINT The "internal setpoint" input is used to specify a setpoint.
PV_IN	REAL	-100.0 to +100.0 (%) or phys. Value 1)	0.0	PROCESS VARIABLE IN An initialization value can be set at the "process variable in" input or an external process variable in floating point format can be connected.

Parameter	Data Type	Range of Values	Default	Description
PV_PER	WORD		W#16#0000	PROCESS VARIABLE PERIPHERAL The process variable in the I/O format is connected to the controller at the "process variable peripheral" input.
MAN	REAL	-100.0 to +100.0 (%) or phys. Value 2)	0.0	MANUAL VALUE The "manual value" input is used to set a manual value using the operator interface functions.
GAIN	REAL		2.0	PROPORTIONAL GAIN The "proportional value" input specifies the controller gain.
TI	TIME	>= CYCLE	T#20s	RESET TIME The "reset time" input determines the time response of the integrator.
TD	TIME	>= CYCLE	T#10s	DERIVATIVE TIME The "derivative time" input determines the time response of the derivative unit.
TM_LAG	TIME	>= CYCLE/2	T#2s	TIME LAG OF THE DERIVATIVE ACTION The algorithm of the D action includes a time lag that can be assigned at the "time lag of the derivative action" input.
DEADB_W	REAL	>= 0.0 (%) or phys. Value 1)	0.0	DEAD BAND WIDTH A dead band is applied to the error. The "dead band width" input determines the size of the dead band.
LMN_HLM	REAL	LMN_LLM ... 100.0 (%) or phys. Value 2)	100.0	MANIPULATED VALUE HIGH LIMIT The manipulated value is always limited by an upper and lower limit. The "manipulated value high limit" input specifies the upper limit.
LMN_LLM	REAL	-100.0... LMN_HLM (%) or phys. Value 2)	0.0	MANIPULATED VALUE LOW LIMIT The manipulated value is always limited by an upper and lower limit. The "manipulated value low limit" input specifies the lower limit.
PV_FAC	REAL		1.0	PROCESS VARIABLE FACTOR The "process variable factor" input is multiplied by the process variable. The input is used to adapt the process variable range.
PV_OFF	REAL		0.0	PROCESS VARIABLE OFFSET The "process variable offset" input is added to the process variable. The input is used to adapt the process variable range.
LMN_FAC	REAL		1.0	MANIPULATED VALUE FACTOR The "manipulated value factor" input is multiplied by the manipulated value. The input is used to adapt the manipulated value range.
LMN_OFF	REAL		0.0	MANIPULATED VALUE OFFSET The "manipulated value offset" is added to the manipulated value. The input is used to adapt the manipulated value range.

Parameter	Data Type	Range of Values	Default	Description
I_ITLVAL	REAL	-100.0 to +100.0 (%) or phys. Value 2)	0.0	INITIALIZATION VALUE OF THE INTEGRAL ACTION The output of the integrator can be set at input I_ITL_ON. The initialization value is applied to the input "initialization value of the integral action."
DISV	REAL	-100.0 to +100.0 (%) or phys. Value 2)	0.0	DISTURBANCE VARIABLE For feed forward control, the disturbance variable is connected to input "disturbance variable."

- 1) Parameters in the setpoint and process variable branches with the same unit
- 2) Parameters in the manipulated value branch with the same unit

Output Parameters

The following table contains the description of the output parameters for SFB 41/FB41 "CONT_C."

Parameter	Data Type	Range of Values	Default	Description
LMN	REAL		0.0	MANIPULATED VALUE The effective manipulated value is output in floating point format at the "manipulated value" output.
LMN_PER	WORD		W#16#0000	MANIPULATED VALUE PERIPHERAL The manipulated value in the I/O format is connected to the controller at the "manipulated value peripheral" output.
QLMN_HLM	BOOL		FALSE	HIGH LIMIT OF MANIPULATED VALUE REACHED The manipulated value is always limited to an upper and lower limit. The output "high limit of manipulated value reached" indicates that the upper limit has been exceeded.
QLMN_LLM	BOOL		FALSE	LOW LIMIT OF MANIPULATED VALUE REACHED The manipulated value is always limited to an upper and lower limit. The output "low limit of manipulated value reached" indicates that the lower limit has been exceeded.
LMN_P	REAL		0.0	PROPORTIONAL COMPONENT The "proportional component" output contains the proportional component of the manipulated variable.
LMN_I	REAL		0.0	INTEGRAL COMPONENT The "integral component" output contains the integral component of the manipulated value.
LMN_D	REAL		0.0	DERIVATIVE COMPONENT The "derivative component" output contains the derivative component of the manipulated value.
PV	REAL		0.0	PROCESS VARIABLE The effective process variable is output at the "process variable" output.
ER	REAL		0.0	ERROR SIGNAL The effective error is output at the "error signal" output.

Bijlage 3: Software huidige regeling

SIMATIC HocoChrome\ 05/08/2014 10:32:25 AM
Chroom-Proces\CPU 315-2 DP\...\FC18 - <offline>

FC18 - <offline>

"PID_Temperatuur" PID REGELAAR VOOR TANK TEMP. T-1003
Name: PID5 Family:
Author: Version: 0.0
Block version: 2
Time stamp Code: 12/12/2013 08:23:52 PM
Interface: 12/12/2003 04:04:07 PM
Lengths (block/logic/data): 01576 01410 00034

Name	Data Type	Address	Comment
IN		0.0	
OUT		0.0	
IN_OUT		0.0	
TEMP		0.0	
Alarm1	Real	0.0	
HEAT	Bool	4.0	
Heat_on	Real	6.0	
KWKlep	Int	10.0	
RETURN		0.0	
RET_VAL		0.0	

Block: FC18 PID temperatuur Chroomtank

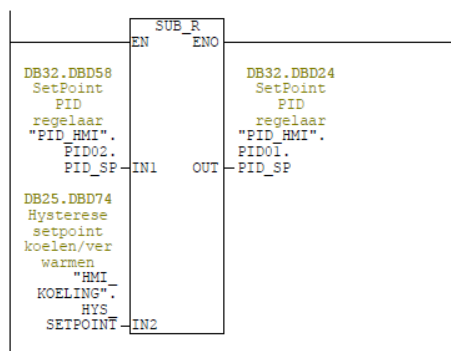
Instellingen van HMI naar regelaar

Network: 1 PID 1 temperatuur Chroombad

Regelaars op Hand ?



Network: 2 Setpoint stoomregelaar



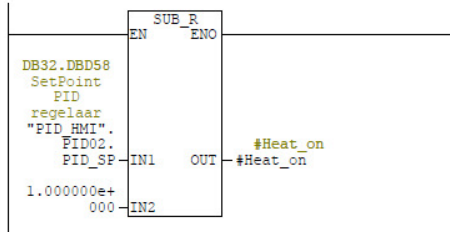
SIMATIC

HocoChrome\

05/08/2014 10:32:25 AM

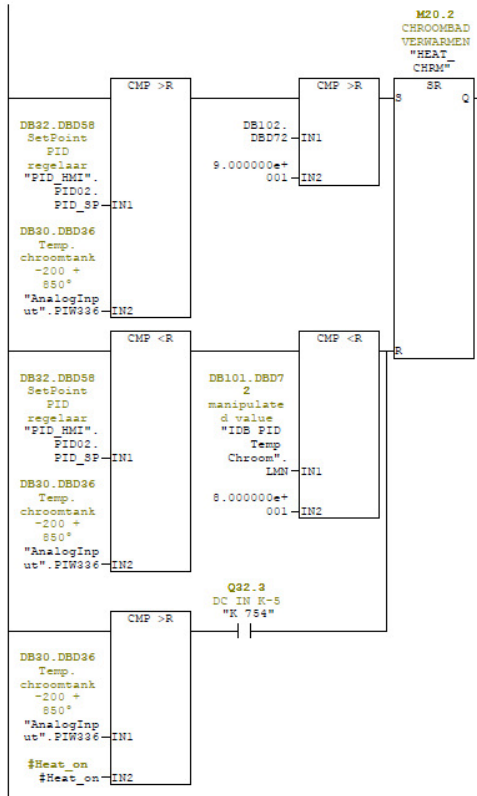
Chroom-Proces\CPU 315-2 DP\...\FC18 - <offline>

Network: 3



Network: 4 CHROOMBAD VERWARMEN

Er is zowel voor water als stoom een PID regelaar
 Als setpoint kleiner dan PV AND Waterklepregelaar < 10% Stoom regelaar
 Als setpoint groter dan PV AND Stoomregelaar output < 10% Water regelaar
 Vergelijking DC ON en Temperatuur > Setpoint -1.0 reset verwarmen 4/4/2011



SIMATIC

HocoChrome\
Chroom-Proces\CPU 315-2 DP\...\FC18 - <offline>

05/08/2014 10:32:25 AM

```

Network: 5
PV naar regelaars en HMI en
Bij verwarmen SP Waterregelaar op 100% gevolg output gaat naar 0 is klep dicht.
Bij koelen SP Stoomregelaar op 0% gevolg output 0 klep dicht

// PV naar regelaars en HMI
L   "AnalogInput".PIW336                                DB30.DBD36      -- Temp. chroomtank
T   "IDB PID Temp Chroom".PV_IN // Proces Value naar stoomreg. DB101.DBD10     -- process variable
T   DB102.DBD 10 // Proces Value naar waterreg.
T   "PID_HMI".PID01.PID_PV // Proces Value naar HMI DB32.DBD28      -- ProcessValue PID
                                     regelaar
AN   "HEAT_CHRM" //Verwarmen ?? M20.2          -- CHROOMBAD VERWAR
JC   M001
L   "PID_HMI".PID02.PID_SP // Setpoint HMI DB32.DBD58      -- SetPoint PID reg
L   "HMI_KOELING".HYS_SETPOINT DB25.DBD74      -- Hysterese setpoi
-R   nt koelen/verwarmen
T   "IDB PID Temp Chroom".SP_INT // Naar Stoomregelaar DB101.DBD6      -- internal setpoin
L   1.000000e+002 // Zet waterregelaar setpoint op 100
T   DB102.DBD 6 // Met gevolg waterklep dicht
JU   M002 // Spring naar einde
M001: L "PID_HMI".PID02.PID_SP // Setpoint HMI DB32.DBD58      -- SetPoint PID reg
T   DB102.DBD 6 // Naar waterregelaar
L   0.000000e+000 // Set setpoint stoomregelaar op 0
T   "IDB PID Temp Chroom".SP_INT // Met gevolg stoomklep dicht. DB101.DBD6      -- internal setpoin
M002: NOP 0

```

```

Network: 6 PID Chroombad
Stoomklep verwarming

A   M 70.0
=   L 10.1
BLD 103
A   M 1.0
JNB _001
CALL "CONT_C" , "IDB PID Temp Chroom" FB41 / DB101 -- Continuous Control / Instance DB PID regelaar temperatu
                                     ur chroombad

COM_RST :=
MAN_ON :=L10.1
PVPER_ON:=
P_SEL :=
I_SEL :=
INT_HOLD:=
I_ITL_ON:=
D_SEL :=
CYCLE :=T#100MS
SP_INT :=
PV_IN :=
PV_PER :=
MAN := "PID_HMI".PID01.PID_OUT DB32.DBD32 -- Output PID regelaar
GAIN :=1.000000e+000
TI :=T#20S
TD :=
TM_LAG :=
DEADB_W :=
LMN_HLM :=
LMN_LLM :=
PV_FAC :=
PV_OFF :=
LMN_FAC :=
LMN_OFF :=
I_ITLVAL:=
DISV :=
LMN :=
LMN_PER :=
QLMN_HLM:=
QLMN_LLM:=
LMN_F :=

```

SIMATIC HocoChrome\ 05/08/2014 10:32:25 AM
Chroom-Proces\CPU 315-2 DP\...\FC18 - <offline>

```
LMN_I :=
LMN_D :=
PV :=
ER :=
_001: NOP 0
```

Network: 7 Stoomregeling Chroombad naar HMI				
Diverse instelling doorgeven aan HMI, en analoge kaart				
L	"IDB PID Temp Chroom".GAIN	// P instelling	DB101.DBD20	-- proportional gain
T	"PID_HMI".PID01.PID_P	// naar HMI	DB32.DBD12	-- P actie PID regel
			aar	
L	"IDB PID Temp Chroom".TI	// I instelling	DB101.DBD24	-- reset time
DTR		// Converteer naar real		
T	"PID_HMI".PID01.PID_I	// Naar HMI	DB32.DBD16	-- I actie PID regel
			aar	
L	"IDB PID Temp Chroom".TD	// D instelling	DB101.DBD28	-- derivative time
DTR		// Converteer naar real		
T	"PID_HMI".PID01.PID_D	// Naar HMI	DB32.DBD20	-- D actie PID regel
			aar	
L	"IDB PID Temp Chroom".LMN	// uitgang PID regelaar	DB101.DBD72	-- manipulated value
T	"AnalogOutput".PQW304	// Naar DB outputs	DB31.DBD4	-- Analoge uitgang 1
T	"PID_HMI".PID01.PID_OUT	// output voor HMI	DB32.DBD32	-- Output PID regela
			ar	

Network: 8 PID 2 Chroombad	
Waterklep koeling	

```
A      M      70.0
=      L      10.1
BLD    103
A      M      1.0
JNB     002
CALL    "CONT_C" , DB102          FB41          -- Continuous Control
COM_RST :=
MAN_ON  :=L10.1
PVPER_ON:=
P_SEL  :=
I_SEL  :=
INT_HOLD:=
I_ITL_ON:=
D_SEL  :=
CYCLE  :=T#100MS
SP_INT :=
PV_IN  :=
PV_PER :=
MAN    :="PID_HMI".PID02.PID_OUT DB32.DBD66      -- Output PID regelaar
GAIN   :=2.000000e+000
TI     :=T#2S
TD     :=
TM_LAG :=
DEADB_W:=
LMN_HLM:=
LMN_LLM:=
PV_FAC :=
PV_OFF :=
LMN_FAC:=
LMN_OFF:=
I_ITLVAL:=
DISV   :=
LMN    :=
LMN_PER:=
OLMN_HLM:=
OLMN_LLM:=
LMN_P  :=
LMN_I  :=
LMN_D  :=
PV     :=
ER     :=
_002: NOP 0
```

SIMATIC HocoChrome\ 05/08/2014 10:32:25 AM
Chroom-Proces\CPU 315-2 DP\...\FC18 - <offline>

Network: 9 Waterregeling Chroombad naar HMI					
Diverse instelling doorgeven aan HMI, en analoge kaart					
L	DB102.DBD	20	// P instelling		
T	"PID_HMI".PID02.PID_P		// Naar HMI	DB32.DBD46	-- P actie PID regelaar
L	DB102.DBD	24	// I instelling		
DTR	"PID_HMI".PID02.PID_I		// Naar HMI	DB32.DBD50	-- I actie PID regelaar
L	DB102.DBD	28	// D instelling		
DTR	"PID_HMI".PID02.PID_D		// Naar HMI	DB32.DBD54	-- D actie PID regelaar
L	DB102.DBD	72	// uitgang PID regelaar		
T	"AnalogOutput".POW275		// Naar DB outputs	DB31.DBD36	
T	"PID_HMI".PID02.PID_OUT		// output voor HMI	DB32.DBD66	-- Output PID regelaar

Network: 10 Alarm stoom en waterklep gelijk open

