

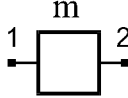
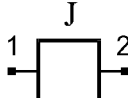
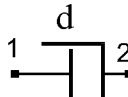
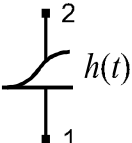




# Beschrijving van elektro- mechanische systemen – Bijlagen

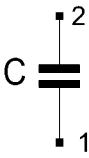
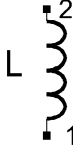
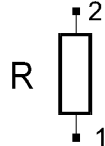
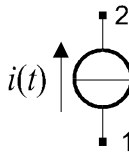
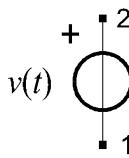

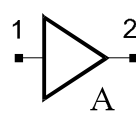
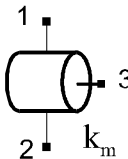
**ir. C. Kleijn, dr. ir. T.J.A. de Vries**

**Bijlage 1: Iconen**

In de afgebeelde iconen hebben de connectiepunten (terminals) een nummer gekregen ter identificatie. In de vergelijkingen wordt verondersteld dat de terminal met het hoogste nummer de “uitgang” is. Merk op dat de tekens in de vergelijkingen per probleem kunnen afwijken, afhankelijk van de keuze van referentierichtingen etc.

| naam                                      | icoon   | vergelijking(en)   | parameter(s)   |
|---|---|--|--|
| translatieveer                            |    | $F_1 = F_2 = c(x_2 - x_1)$   | stijfheid $c$ [ $\text{N m}^{-1}$ ]                                      |
| rotatieveer                               |    | $T_1 = T_2 = k(q_2 - q_1)$   | stijfheid $k$ [ $\text{Nm}$ ]  |
| massa                                     |   | $\dot{x}_1 = \dot{x}_2 = \frac{1}{m} \dot{\alpha}(F_2 + F_1)dt$                        | massa $m$ [ $\text{kg}$ ]  |
| massa-<br>traagheid                       |  | $\dot{q}_1 = \dot{q}_2 = \frac{1}{J} \dot{\alpha}(T_2 + T_1)dt$                        | massatraagheid<br>$J$ [ $\text{kg m}^2$ ]                                |
| wrijving/<br>demper                       |  | $F_1 = F_2 = d(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$<br>of<br>$T_1 = T_2 = d(\dot{q}_2 - \dot{q}_1)$ | demping $d$ [ $\text{Ns m}^{-1}$ ]<br>of<br>demping $d$ [ $\text{Nsm}$ ] |
| krachtbron                                | $1 \leftarrow F(t) \rightarrow 2$   | $F_1 = F_2 = F(t)$   |  |
| koppelbron                                | $1 \leftarrow T(t) \rightarrow 2$   | $T_1 = T_2 = T(t)$   |  |
| opzetfunctie /<br>voorgeschre-<br>ven pad |  | $x_2 = x_1 + h(t)$<br>of<br>$q_2 = q_1 + h(t)$   |  |
| vaste wereld<br>(translatie)              |  | $\dot{x}_1 = 0$<br>of  |  |
| vaste wereld<br>(rotatie)                 |  | $\dot{q}_1 = 0$  |  |

|                         |  |   |  |
|-------------------------|--|---|--|
| overbrenging            |  | $\dot{x}_2 = i \dot{x}_1 \quad \text{en} \quad F_1 = i F_2$ <p style="text-align: center;">of</p> $\dot{q}_2 = i \dot{q}_1 \quad \text{en} \quad T_1 = i T_2$                             | overbreng-<br>verhouding $i$ [ ]         |
| transformator           |  | $b \dot{x}_2 = a \dot{x}_1 \quad \text{en} \quad b F_1 = a F_2$ <p style="text-align: center;">of</p> $b \dot{q}_2 = a \dot{q}_1 \quad \text{en} \quad b T_1 = a T_2$                     | lengte $a$ [m], $b = 1$<br>of vice versa |
| snelheids-<br>optelling |  | $\dot{x}_3 = \dot{x}_1 + \dot{x}_2 \quad \text{en} \quad F_1 = F_2 = F_3$ <p style="text-align: center;">of</p> $\dot{q}_3 = \dot{q}_1 + \dot{q}_2 \quad \text{en} \quad T_1 = T_2 = T_3$ |  |

|                          |   |   |   |
|--------------------------|---|---|---|
| capaciteit               |    | $v_2 - v_1 = \frac{1}{C} \dot{Q}_1 dt = \frac{1}{C} \dot{Q}_2 dt$ | capaciteit C [F]                              |
| inductantie              |    | $i_1 = i_2 = \frac{1}{L} \dot{\Phi}(v_2 - v_1) dt$                | inductantie L [H]                             |
| weerstand                |    | $v_2 - v_1 = R i_1 = R i_2$                                       | weerstand R [ $\Omega$ ]                      |
| stroombron               |   | $i_1 = i_2 = i(t)$  |   |
| spanningsbron            |  | $v_2 = v_1 + v(t)$  |   |
| aarde                    |  | $v_1 = 0$   |   |
| versterker               |  | $v_2 = A v_1$   | versterking A [ ]                             |
| elektromotor<br>(ideaal) |  | $T_3 = k_m i_1 = k_m i_2$<br><i>en</i><br>$v_1 - v_2 = k_m T_3$   | motorconstante<br>$k_m$ [Nm A <sup>-1</sup> ] |

**Bijlage 2: Bondgrafen***Inleiding*

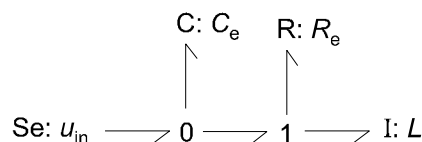
Bij het analyseren en ontwerpen van technische systemen die meerdere fysische domeinen omvatten is het gebruik van adequate modellen van groot belang. Met de bondgraafaanpak zijn dergelijke modellen snel en eenvoudig te maken en flexibel aan te passen als het ontwerp-proces dat vereist.

In deze bijlage worden de basisbegrippen van de bondgraafaanpak behandeld. Een eenvoudige methode voor het opstellen van een bondgraafmodel zal worden toegelicht in bijlage 3. Daarnaast zal daar worden uitgelegd hoe een bondgraafmodel omgezet kan worden in een normaal blokschema model en hoe de dynamische vergelijkingen afgeleid kunnen worden.

*Netwerken van elementen*

Bondgrafen zijn een netwerk-achtige beschrijving van fysische systemen in termen van ideale fysische processen (zie A0300). In de bondgraafmethode delen we de systeemeigenschappen op in een denkbeeldige set van gescheiden *elementen* (geïdealiseerde fysische processen) die worden weergegeven met typerende letters. De elementen zijn opgenomen in een netwerkstructuur (zie figuur 1). De verbindingen in dit netwerk, aangeduid als *bonds*, stellen ideale vermogensuitwisselingen voor. Bonds worden weergegeven met halve pijlen. Dit betekent dat een systeem wordt beschreven als een aantal fysische concepten (de elementen) waartussen energiestromen lopen (de bonds).

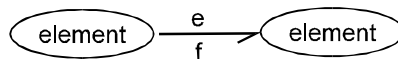
Van een elektrisch netwerk zullen we de verbindingen, wanneer we ze ideaal veronderstellen, met bonds weergeven. Voor een ideale stroombron gebruiken we het element  $S_f$ , en voor een spanningsbron het element  $S_e$ . Weerstanden worden weergegeven met een  $R$ , capaciteiten met een  $C$  en inductanties met een  $I$ . Met een '1' leggen we een serieschakeling van de aangesloten elementen vast, en met een '0' een parallelschakeling. In figuur 1 staat een eenvoudig bondgraafmodel weergegeven. Dit model beschrijft dus [een parallelschakeling van een spanningsbron, een capaciteit en [een serieschakeling van een weerstand en een inductantie]].



Figuur 1. Bondgrafen zijn netwerken met elementen (letters en cijfers; fysische concepten) en bonds (halve pijlen; ideale energie-overdracht).

*Effort & Flow*

De energiestroom langs een bond wordt altijd door twee variabelen gekarakteriseerd, waarvan het product een vermogen is. Deze variabelen worden volgens de bondgraaf notatie *effort* (e) en *flow* (f) genoemd (zie figuur 2). Zo'n effort en een flow vormen een combinatie die kenmerkend is voor een fysisch domein. Zo kennen we onder andere de combinatie spanning en stroom voor een elektrisch netwerk en de combinatie kracht en snelheid voor een mechanisch systeem.



Figuur 2. Effort en Flow als variabelen van een bond.

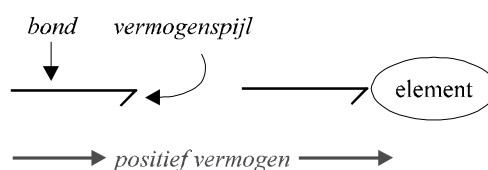
Het product van de variabelen van zo'n combinatie is steeds vermogen. We noemen zo'n variabelenpaar *vermogensgeconjugeerde* variabelen. Voor het modelleren met bondgrafen zijn er voor ieder domein vaste afspraken gemaakt over de effort en flow variabelen. Tabel 1 geeft voor een aantal domeinen de bijbehorende effort en flow variabelen.

| Domein                     | effort (e)        | flow (f)                                |
|----------------------------|-------------------|---|
| elektromagnetisch          | spanning, $u$ [V] | stroom, $i$ [A]                         |
| mechanisch<br>(translatie) | kracht, $F$ [N]   | snelheid, $v$ [m/s]                     |
| mechanisch (rotatie)       | koppel, $M$ [Nm]  | hoeksnelheid, $w$ [rad/s]               |
| hydraulisch                | druk, $p$ [Pa]    | volumedebiet, $f_v$ [m <sup>3</sup> /s] |

Tabel 1. De effort en flow variabelen voor een aantal domeinen.

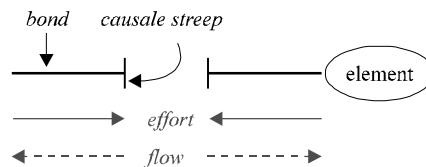
*Bond*

Als in een bond de effort en flow beide een positieve of beide een negatieve waarde hebben is het vermogen positief. Om de stroomrichting van het positieve vermogen aan te geven gebruiken we bij een bond een halve pijl (figuur 3). Een element met daarop aangesloten een ingaande bond neemt per definitie dus vermogen op als het product van effort en flow positief is.



Figuur 3. Een bond als vermogens verbinding.

Van de twee elementen die een bond met elkaar verbindt zal er één de grootte van de effort vastleggen, terwijl het andere element de grootte van de flow zal bepalen. Het element dat de effort vastlegt, krijgt de flow “opgedrukt” door het andere element. We kunnen een bond dan ook interpreteren als een tweevoudige signaalverbinding (effort–signaal en flow–signaal), waarvan de richtingen altijd tegengesteld aan elkaar zijn. Dit wordt *bilateraal* genoemd. Met de richting bedoelen we de richting van de informatiestroom, net zoals in een blokschema. In een blokdiagram worden de effort en flow variabelen die samen een vermogensstroom vormen echter niet bij elkaar gezet, waardoor de symmetrie tussen de structuur van het fysische systeem en de structuur van het model verdwijnt.



Figuur 4. Een bond als bilaterale signaalstroom

De interpretatie van een bond als een bilaterale signaalverbinding legt de richting van de effort en flow nog niet vast. Het geeft alleen aan dat ze tegengesteld van richting zijn. Voor het afleiden van vergelijkingen voor bijvoorbeeld simulatie zijn deze signaalrichtingen wel van belang. We hoeven echter maar één teken te gebruiken om de richting van effort en flow vast te leggen, juist vanwege het bilaterale karakter. Er wordt hiervoor een klein streepje (causale streepje) loodrecht op de bond gebruikt dat de richting van de effort aangeeft (figuur 4). De keuze van de signaalrichting, ook wel *causaliteit* genoemd, hangt af van het betreffende element dat aan de bond aangesloten is.

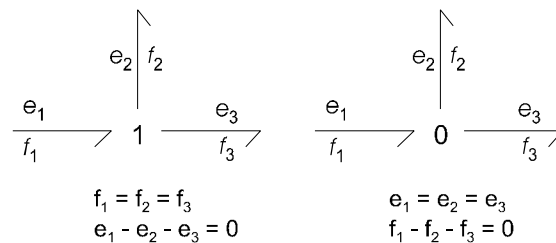
### *0 en 1 juncties*

Juncties *koppelen* twee of meer elementen van een fysisch systeem op een vermogenscontinue manier: er wordt geen energie opgeslagen of gedissipeerd. Voorbeelden zijn een serieschakeling of een parallelschakeling in een elektrisch netwerk, en een starre verbinding tussen onderdelen van een mechanisch systeem. Er bestaan 2 soorten juncties, namelijk 0- en 1-juncties.

De 0-junctie representeert een knooppunt waarbij alle efforts van de aangesloten bonds gelijk zijn. Als gevolg van de vermogenscontinuïteit geldt dat de som van de flows dan nul moet zijn. Bij deze sommatie moet de oriëntatie van de bonds worden betrokken: alle flows van ingaande bonds worden bij het totaal opgeteld, en alle flows van uitgaande bonds worden afgetrokken. Deze sommatie komt overeen met de stroomwet

van Kirchhoff voor elektrische netwerken. De vereiste gelijkheid van de efforts *beperkt de causaliteit*. Slechts één bond mag een *effort-in causaliteit* (het streepje naar de 0 toegericht) hebben; alle overige bonds moeten, vanuit de 0-junctie gezien, een effort-out causaliteit hebben.

De 1-junctie is de duale vorm van de 0-junctie (de rollen van flow en effort zijn omgekeerd). De 1-junctie representeert dus een knooppunt waarbij alle flows van de aangesloten bonds gelijk zijn. De som van de efforts is nu nul, als gevolg van de vermogenscontinuïteit. Ook hier zorgt de oriëntatie van de bonds voor het plus of minteken bij de effort sommatie. Deze sommatie komt overeen met de spanningswet van Kirchhoff voor elektrische netwerken. De gelijkheid van de flows *beperkt de causaliteit*. Slechts één bond mag een *flow-out causaliteit* (open uiteinde) hebben.



Figuur 5. De 1-junctie en 0-junctie.

### Elementen

Naast de 0- en de 1-junctie kennen we bij bondgrafen nog een aantal standaard elementen die met mnemonische codes in de vorm van letters worden weergegeven. Deze zijn op te delen in buffers, weerstanden, bronnen en transducenten.

### Buffers

Buffers zijn bondgraafelementen die energie kunnen opslaan. Er zijn twee soorten buffers: C-elementen en I-elementen. In tabel 2 vinden we de effort- en flow-beschrijvingen die bij deze elementen horen. De parameters *C* en *I* zijn *bufferkonstanten* die een lineaire bufferkarakteristiek vastleggen. Als voorbeeld zijn twee lineaire bufferrealisaties uit het mechanische rotatie domein (rotatie veer, massa traagheid) en het elektromagnetisch domein (condensator en spoel) weergegeven. De parameters representeren respectievelijk de reciproke veerconstante ( $1/k$ ), de massa traagheid (*J*), de capaciteit (*C*) en de magnetische inductie (*L*). Merk op dat ook niet-lineaire realisaties kunnen worden beschreven; deze kunnen echter niet meer met 1 parameter worden gekarakteriseerd.



| C-element                 | algemeen   | mechanisch<br>(rotatie veer)    | elektro-magnetisch<br>(condensator) |
|---------------------------|--|---------------------------------|-------------------------------------|
| flow-out<br>causaliteit   | $\longrightarrow \nearrow C$ $f = C \frac{de}{dt}$       | $w = \frac{1}{k} \frac{dM}{dt}$ | $i = C \frac{du}{dt}$               |
| effort-out<br>causaliteit | $\longleftarrow \nearrow C$ $e = \frac{1}{C} \int f dt$  | $M = k \int w dt$               | $u = \frac{1}{C} \int i dt$         |
| I-element                 | algemeen   | mechanisch<br>(massatraagheid)  | elektro-magnetisch<br>(spoel)       |
| flow-out<br>causaliteit   | $\longrightarrow \nearrow I$ $f = \frac{1}{I} \int e dt$ | $w = \frac{1}{J} \int M dt$     | $i = \frac{1}{L} \int u dt$         |
| effort-out<br>causaliteit | $\longleftarrow \nearrow I$ $e = I \frac{df}{dt}$        | $M = J \frac{dw}{dt}$           | $u = L \frac{di}{dt}$               |

Tabel 2. De effort- en flow-relaties van het C-element en het I-element.

Bij buffers wordt de richting van de effort en flow op de aangesloten bond niet vastgelegd. Ze kunnen in beide vormen voorkomen. Omdat we bij de simulatie van dynamische modellen liever niet met differentiatie naar de tijd werken, kiezen we bij voorkeur een bufferbeschrijving met integratie naar de tijd. Met andere woorden, het C-element heeft als *voorkeurscausaliteit* een *effort-out causaliteit* en het I-element heeft als *voorkeurscausaliteit* de *flow-out causaliteit*.

### Weerstand

Een weerstand, R, dissipeert vrije energie. Deze energie van een willekeurig fysisch domein wordt *irreversibel* omgezet naar het thermische domein. Dit betekent dat de energiestroom naar een weerstand altijd positief is. In tabel 3 vinden we de effort- en flow-beschrijving van dit element. Als voorbeeld zijn twee lineaire realisaties weergegeven, beide gekarakteriseerd door de parameter R: een mechanische (visceuse) demper en een elektrische (ohmse) weerstand.

| R-element              | algemeen   | mechanisch<br>(demper) | elektro-magnetisch<br>(weerstand) |
|------------------------|--|------------------------|-----------------------------------|
| flow-out causaliteit   | $\longrightarrow \nearrow R$ $f = \frac{1}{R} e$ | $w = \frac{1}{R} M$    | $i = \frac{1}{R} u$               |
| effort-out causaliteit | $\longleftarrow \nearrow R$ $e = R f$            | $M = R w$              | $u = R i$                         |

Tabel 3. De effort- en flow-relaties van het R-element.

De richting van de effort en flow wordt bij een weerstand niet vastgelegd. Ze kunnen in beide vormen voorkomen. Met andere woorden, het R-element heeft een *vrije causaliteit*.

*Bronnen*

Bronnen representeren de interactie van een systeem met de omgeving. Er zijn twee soorten bronnen: Se-element en Sf-element. In tabel 4 vinden we de effort- en flow-beschrijvingen die bij deze elementen horen. Als voorbeeld zijn twee constante bronnen uit het mechanische rotatie domein (vaste hoeksnelheid, vast koppel) en het elektro-magnetisch domein (stroombron en spanningsbron) weergegeven. *c* is steeds een parameter met een constante waarde.

| <i>Sf-element</i>             | <i>algemeen</i>                                  | <i>mechanisch (hoeksnelheid)</i> | <i>elektro-magnetisch (stroombron)</i>    |
|-------------------------------|--|----------------------------------|---|
| <i>flow-out causaliteit</i>   | $Sf \dashv \rhd$<br>$f = c$<br>$e = \text{vrij}$ | $w = c$<br>$M = \text{vrij}$     | $i = c$<br>$u = \text{vrij}$              |
| <i>Se-element</i>             | <i>algemeen</i>                                  | <i>mechanisch (koppel)</i>       | <i>elektro-magnetisch (spanningsbron)</i> |
| <i>effort-out causaliteit</i> | $Se \dashv \rhd$<br>$e = c$<br>$f = \text{vrij}$ | $M = c$<br>$w = \text{vrij}$     | $u = c$<br>$i = \text{vrij}$              |

Tabel 4. De effort- en flow-relaties van het Se-element en het Sf-element.

De richting van de effort en flow zijn bij bronnen vastgelegd. Ze kunnen maar in één vorm voorkomen. Met andere woorden, het Se-element heeft als *gefixeerde causaliteit* een *effort-out causaliteit* en het I-element heeft als *gefixeerde causaliteit* de *flow-out causaliteit*.

*Transformatoren en gyratoren*

Tranformatoren en gyratoren zijn bondgraafelementen die energie ideaal kunnen omzetten, zowel binnen één fysisch domein als van het ene naar het andere fysische domein. Een transformator geven we aan met de code ‘TF’ en een gyrator geven we aan met ‘GY’. In tabel 5 vinden we de effort- en flow-beschrijvingen die bij deze elementen horen. De parameters *n* en *r* noemen we respectievelijk de *transformatieverhouding* en de *gyratieverhouding*. Als voorbeeld is een tranformator uit het mechanische rotatie domein (tandwielkast) en een gyrator uit het elektomechanische domein (gelijkstroom motor) weergegeven. De parameters representeren respectievelijk de overbrengingsverhouding en de motorkonstante.

| <i>TF-element</i>                                    | <i>algemeen</i>   |  | <i>mechanisch</i><br><i>(tandwielkast)</i>             |
|--|---|--|--|
| <i>flow-out causaliteit</i> (op de inkomende bond)   | $\frac{e_1}{f_1} \rightarrow TF \leftarrow \frac{e_2}{f_2}$ | $f_1 = \frac{1}{n} f_2$<br>$e_2 = \frac{1}{n} e_1$ | $w_1 = \frac{1}{n} w_2$<br>$M_2 = \frac{1}{n} M_1$     |
| <i>effort-out causaliteit</i> (op de inkomende bond) | $\frac{e_1}{f_1} \rightarrow TF \leftarrow \frac{e_2}{f_2}$ | $f_2 = n f_1$<br>$e_1 = n e_2$                     | $w_2 = n w_1$<br>$M_1 = n M_2$                         |
| <i>GY-element</i>                                    | <i>algemeen</i>   |  | <i>elektromechanisch</i><br><i>(gelijkstroommotor)</i> |
| <i>flow-out causaliteit</i>                          | $\frac{e_1}{f_1} \rightarrow GY \leftarrow \frac{e_2}{f_2}$ | $f_2 = \frac{1}{r} e_1$<br>$f_1 = \frac{1}{r} e_2$ | $w = \frac{1}{k_m} u$<br>$i = \frac{1}{k_m} M$         |
| <i>effort-out causaliteit</i>                        | $\frac{e_1}{f_1} \rightarrow GY \leftarrow \frac{e_2}{f_2}$ | $e_2 = r f_1$<br>$e_1 = r f_2$                     | $M = k_m i$<br>$u = k_m w$                             |

Tabel 5. De effort- en flow-relaties van het TF-element en het GY-element.

De richtingen van de efforts en flows worden bij een transformator en gyrator deels vastgelegd. We spreken hier (net als bij de juncties) van een *causale beperking*. Voor een TF-element geldt dat één bond de *effort-out causaliteit* heeft en de andere de *flow-out causaliteit*. Voor een GY-element geldt dat beide bonds òf een *effort-out causaliteit* hebben òf een *flow-out causaliteit*.

### Overige Elementen

Er zijn nog een aantal standaard bondgraaf elementen die we hier niet verder zullen behandelen. Voor een uitgebreide beschouwing van deze elementen wordt verwezen naar [1]. Daarnaast geeft de bondgraafmethode de gebruiker de vrijheid om zelf gedefinieerde submodellen toe te voegen. Zolang deze maar een goed gedefinieerde (of zelfs niet-lineaire) relatie tussen de effort en de flow vastleggen. Een dergelijk element wordt dan niet met een mnemonische code maar met een ellips weergegeven, voorzien van een door de gebruiker vrij te kiezen naam.

### *Bondoriëntatie*

De oriëntatie van een bond, dat wil zeggen de richting van de halve pijl, geeft de richting aan van het positieve vermogen. Een element met daarop aangesloten een ingaande bond, neemt dan vermogen op als het produkt van effort en flow positief is. Voor het R-, C- en I-element wordt een ingaande bond als standaard aangehouden. Bij bronnen is de standaardoriëntatie uitgaand, immers een bron levert veelal vermogen aan de rest van het systeem. Voor het Se-element en het Sf-element wordt daarom een uitgaande bond als standaard aangehouden. Voor het TF-element en het GY-element wordt normaliter één ingaande en één uitgaande getekend, want dit geeft het natuurlijke energieverloop weer. Voor de overige bonds in een model wordt zoveel mogelijk de richting van bron naar belasting aangehouden.

### *Signaalbonds en bondactivatie*

Bonds en elementen zijn typisch nuttig wanneer we systeemdelen beschrijven waarin vermogen een rol speelt. In mechatronische systemen zullen deze systeemdelen meestal gekoppeld zijn aan delen waar sprake is van signaalverwerking zonder dat vermogen een rol speelt. Deze delen laten zich handiger in blokschema's beschrijven. Blokschema elementen kunnen in dat geval met bondgrafen gecombineerd worden. Dat wordt gewoonlijk als volgt gedaan.

De signaalbewerking begint op de plaats waar zich een sensor bevindt. Meestal wordt met de sensor een effort, een flow of de integraal van een van deze twee gemeten.

Wanneer er een flow wordt gemeten (bijvoorbeeld de hoeksnelheid), wordt op de plaats van de sensor een 1-junctie in het model opgenomen. Immers, een 1-junctie legt een unieke flow vast. Vanaf deze junctie loopt een zogenaamde *signaalbond* (gewone blokschemapijl) naar het blokschema dat de verdere signaalverwerking vastlegt.

Wanneer de sensor de integraal van een flow als meetsignaal levert (bijvoorbeeld de hoek), wordt in de signaalbond natuurlijk een extra integrator opgenomen.

Het resultaat van de signaalbewerking zal meestal worden omgezet in een energetische actie via een versterker. In een bondgraafmodel kunnen we dit weergeven door vanuit het blokschema een signaalbond te tekenen naar het bronelement waarmee we de versterker modelleren, zie tabel 6. We spreken in dat geval van *bondactivatie* en van een *gemoduleerde bron*, en voegen doorgaans de letter 'M' toe voor de element-aanduiding

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| <i>MSf-element</i>            | <i>algemeen</i>  |
| <i>flow-out causaliteit</i>   | $u \longrightarrow \begin{array}{c} MSf \\ \dot{c} \end{array} \longrightarrow \begin{array}{l} f = c \times u \\ e = \text{vrij} \end{array}$ |
| <i>MSe-element</i>            | <i>algemeen</i>  |
| <i>effort-out causaliteit</i> | $u \longrightarrow \begin{array}{c} MSe \\ \dot{c} \end{array} \longrightarrow \begin{array}{l} e = c \times u \\ f = \text{vrij} \end{array}$ |


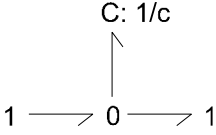

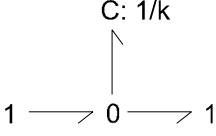
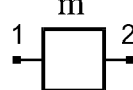

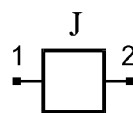

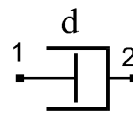
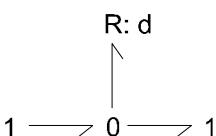
Tabel 6. Gemoduleerde bronnen.

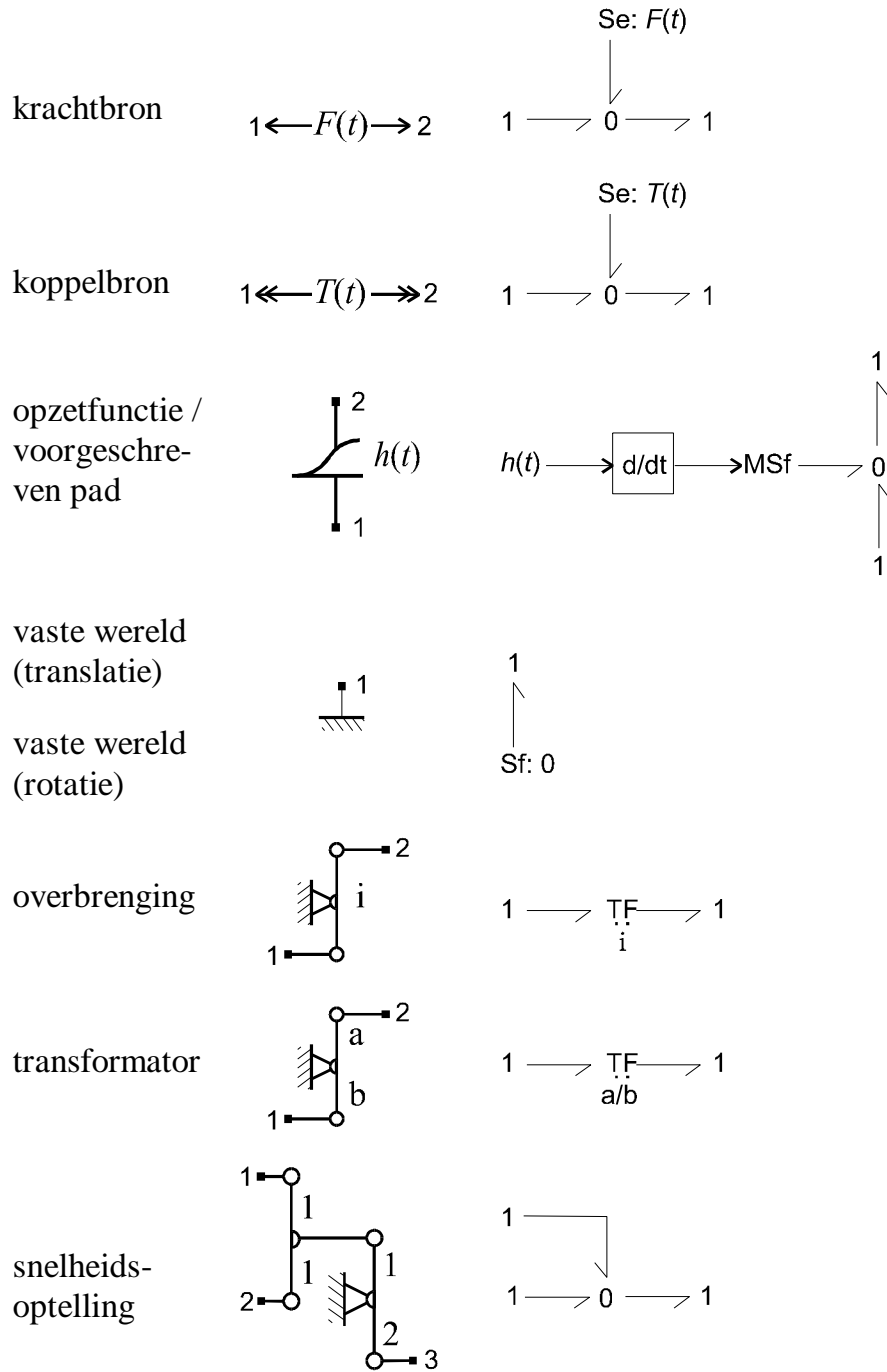
### Bijlage 3: Omzetten van modelrepresentaties

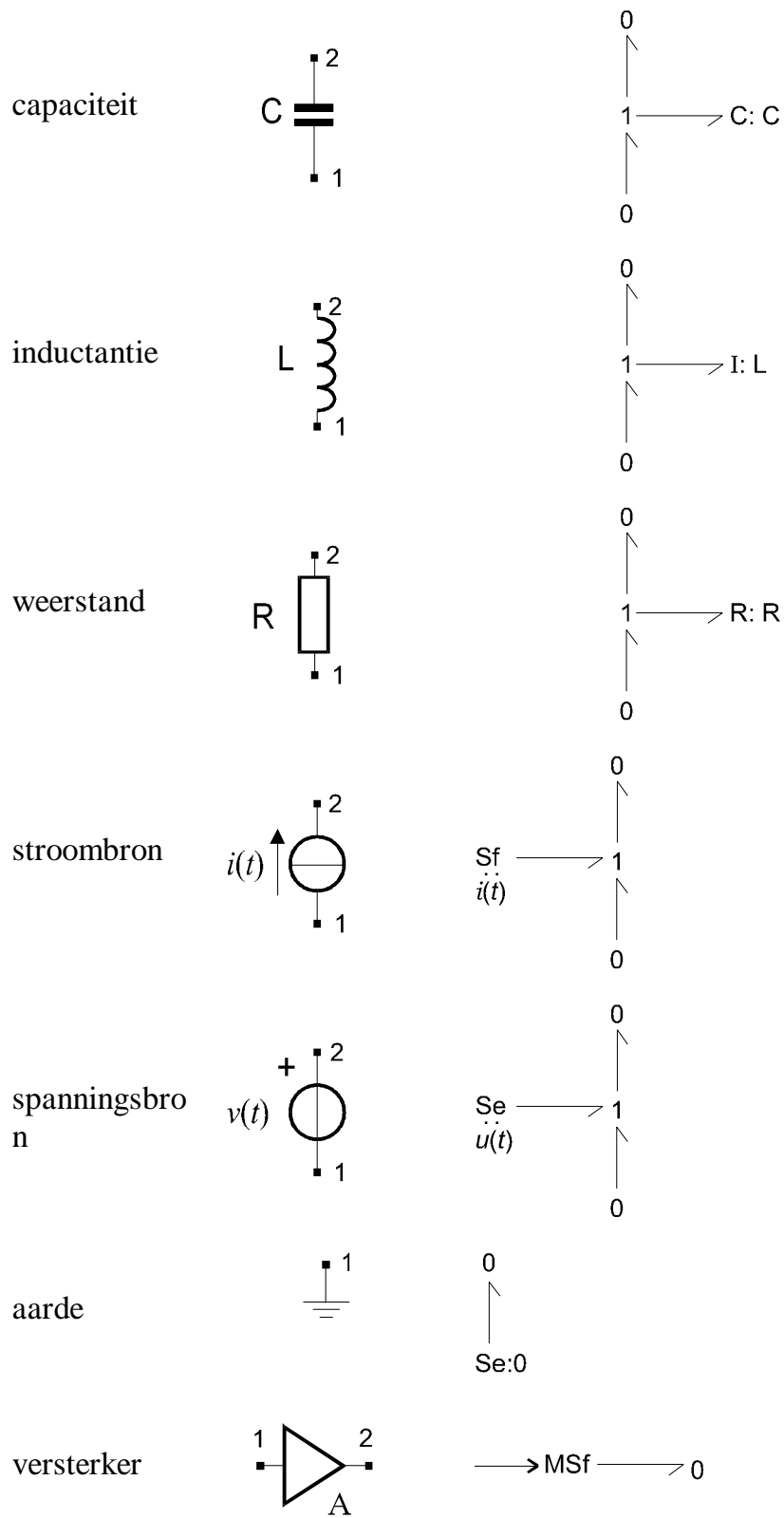
In deze bijlage geven we een procedure voor het omzetten van een iconisch diagram naar een bondgraafmodel, en voor het afleiden van een blokschema en/of een set van vergelijkingen uit een bondgraafmodel. Omzetten van modelrepresentaties in de tegenovergestelde richting is ook mogelijk, maar zal hier niet aan de orde komen.

#### *Van iconisch diagram naar bondgraaf*

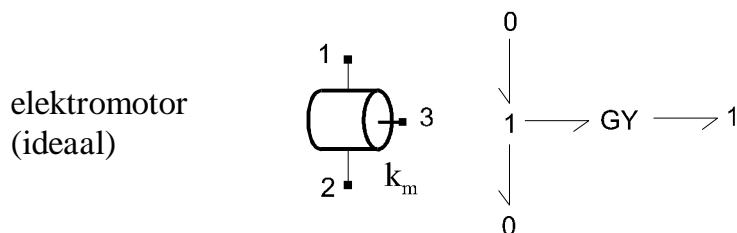
In [1] is een systematische methode beschreven voor het omzetten van algemene iconische diagrammen naar bondgrafen. Omdat we ons hier beperken tot elektro-mechanische systemen bestaande uit iconen zoals beschreven in bijlage 1, is een eenvoudiger aanpak mogelijk. Het blijkt namelijk dat terminals in het elektrische domein zijn te vervangen door 0-juncties, en in het mechanische domein door 1-juncties. Met dat gegeven en kennis van de vergelijkingen van de iconen en de betekenis van de diverse bondgraafelementen kunnen we een tabel opstellen met daarin voor ieder icoon dat we hebben gedefinieerd een bondgraaf fragment.

| naam                | icoon   | equivalent bondgraaf fragment   |
|---------------------|---|---|
| translatieveer      |  | $C: 1/c$<br> |
| rotatieveer         |  | $C: 1/k$<br> |
| massa               |  | $I: m$<br>   |
| massa-<br>traagheid |  | $I: J$<br>   |
| wrijving/<br>demper |  | $R: d$<br>   |



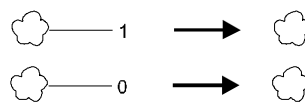




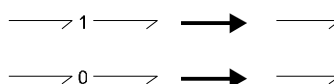


Het omzetten bestaat dan uit het vervangen van de iconen in een diagram door de corresponderende bondgraaf fragmenten, en het zo verkregen model zo ver mogelijk te vereenvoudigen. We passen hierbij de volgende vereenvoudigingsregels toe:

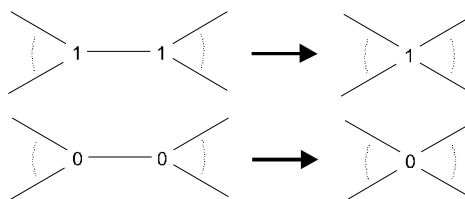
- Verwijdering loshangende juncties.



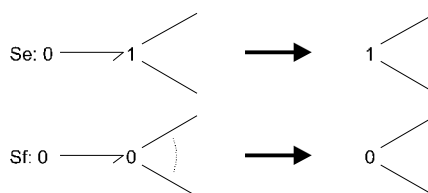
- Eliminatie juncties.



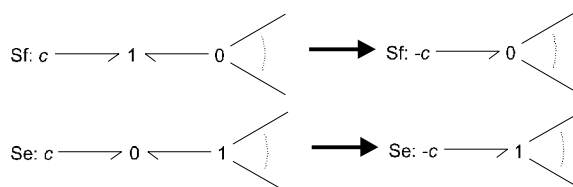
- Samensmelting gelijksoortige juncties.



- Verwijdering bronnen met constante uitgang gelijk aan 0.



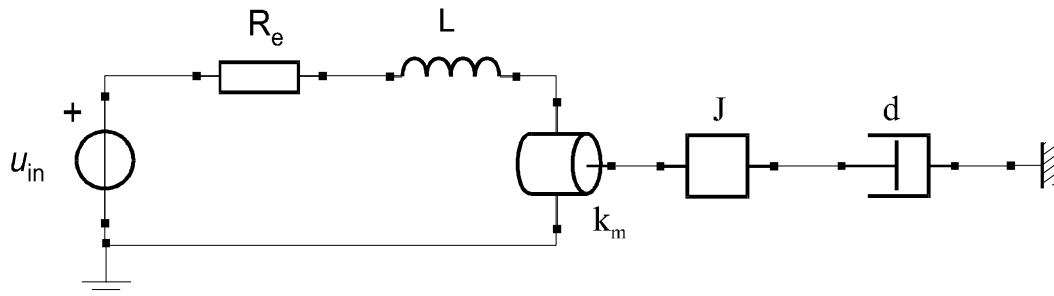
- Eliminatie junctie in combinatie met tekenwisseling bronnen.



De bonds die in de bovenstaande figuren geen halve pijl hebben, mogen in beide oriëntaties voorkomen.

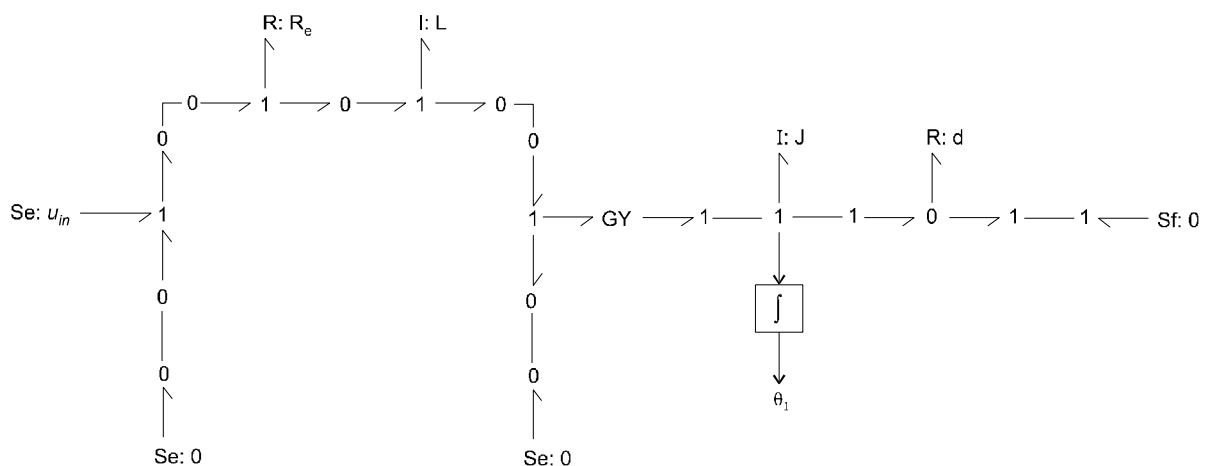
We zullen het omzetten van een iconisch diagram naar het equivalente bondgraafmodel illustreren met het elektro-mechanische systeem zoals dat in figuur 6 is weergegeven.

We zien hier een iconisch diagram van een gelijkstroommotor, gevoed door een elektrisch circuit, waaraan een last met lagerwrijving verbonden is.



Figuur 6: Iconisch diagram van een elektromechanisch systeem.

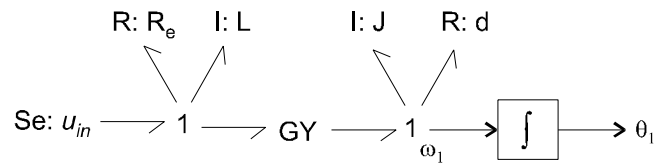
We vervangen in het gegeven model ieder icoon op de aangegeven wijze. Referentiepunten ofwel aardpunten splitsen we zoveel mogelijk op. Voorzover de oriëntatie van de bonds niet door de elementen vastgelegd is volgen we zoveel mogelijk de richting waarin het vermogen afgedragen wordt. Voor het iconisch diagram van figuur 7 levert dit een bondgraaf representatie op zoals getoond in figuur 8.



Figuur 7: Bondgraaf van een elektromechanisch systeem.

Een vergelijking tussen figuur 6 en 7 toont een duidelijke symmetrie tussen het iconisch diagram en de bondgraaf representatie. Dit is een direct gevolg van de vermogens gerelateerde beschrijving door middel van bonds. Toevoegingen of aanpassingen van het iconisch diagram zijn daarom eenvoudig in de bondgraaf door te voeren. Dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld blokschema modellen die bij kleine veranderingen vaak compleet van structuur veranderen en daarom geheel opnieuw

opgesteld moeten worden. Toepassing van de vereenvoudigingsregels leidt tot het bondgraafmodel van figuur 8.



Figuur 8: De vereenvoudigde bondgraaf.

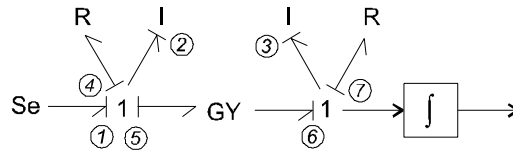
Het vereenvoudigde bondgraafmodel toont geen directe symmetrie meer met het ideaal fysische model. Het geeft ons wel een duidelijker inzicht in de vermogensstromen van de spanningsbron naar de diverse elementen van het systeem.

#### *Van bondgraaf naar blokschema: causaliteit*

Causale analyse is het vaststellen van de richting van de bilaterale signaalstromen die bij de bonds horen. Het resultaat is een causale bondgraaf die te beschouwen is als een compact blokschema. We kunnen uit een causale bondgraaf dan ook rechtstreeks een normaal blokschema afleiden. Voor het causaal maken van een bondgraaf moeten de volgende stappen gevolgd worden:

1. Ken voor alle elementen die een *gefixeerde causaliteit* hebben (Se, Sf) de causaliteit toe. Dat wil zeggen, voeg aan de aangesloten bonds een causaal streepje toe.
2. Ken voor alle elementen die een *causale beperking* hebben (TF, GY, 0, 1) de causaliteit (voor zover reeds mogelijk) toe.
3. Ken voor een willekeurig element met een *voorkeurscausaliteit* (C, I) de causaliteit toe. Dit hoeft niet altijd de voorkeurscausaliteit te zijn. Itereer vervolgens stap 2 en 3 voor zover mogelijk.
4. Ken voor een willekeurig element die een *vrije causaliteit* heeft de causaliteit toe. Indien deze niet vastligt, kies dan willekeurig een causaliteit. Itereer daarna stap 2, 3 en 4 voor zover mogelijk.

Vaak is de volledige bondgraaf al causaal na stap 2. Soms treedt er echter een *causaal conflict* op. Dit betekent dat het opgestelde model rekenkundig niet correct is. Vaak duidt dit op een verkeerd gesteld probleem en zal het model moeten worden aangepast door bijvoorbeeld elementen toe te voegen. Soms is bondgraaf pas causaal na stap 4. Dit betekent dat het model een algebraïsche lus bevat (A0300) [1]. Modellen met algebraïsche lussen zijn in de praktijk moeilijker te simuleren. In figuur 9 is het causale bondgraafmodel te zien. De cijfers bij de causale strepen geven de volgorde aan waarin ze zijn toegekend.



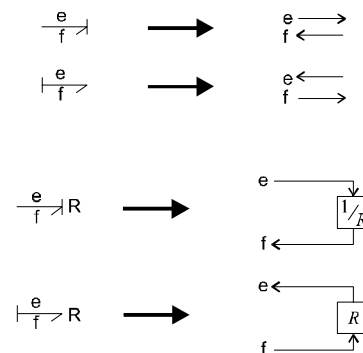
Figuur 9: De causale bondgraaf.

Moderne computerprogramma's voor modelvorming en simulatie, zoals 20-sim [2], zijn in staat om de causaliteit in een bondgraaf automatisch toe te kennen. De gebruiker hoeft alleen te zorgen dat van elke element in de bondgraaf een dynamische vergelijking bekend is. Vaak zijn dat standaard bondgraaf elementen die al in het programma aanwezig zijn. Uit het causale model kan dan automatisch een simulatiemodel berekend worden.

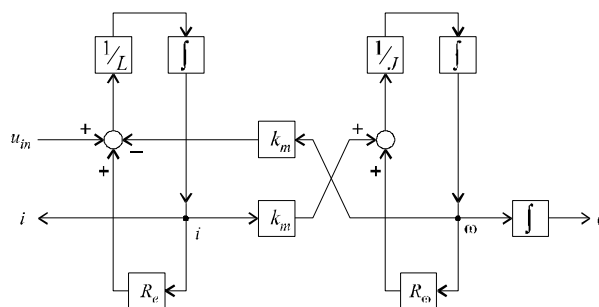
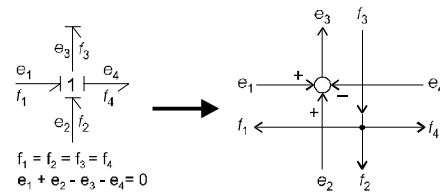
#### Afleiden modelberekeningen

Met de causale bondgraaf kunnen gemakkelijk een equivalent blokschema model of de dynamische vergelijkingen worden afgeleid. We passen hierbij de volgende stappen toe:

- Vervang de bonds door de bilaterale signalen.
- Vervang elementen door corresponderende blokschema symbolen. Kijk hiervoor naar de passende effort en flow beschrijving (zie sectie 6) van het element. Als voorbeeld zijn hiernaast de beide beschrijvingen voor het R-element gegeven.



- Vervang de juncties door optelpunten en signaalsplitsingen. Als het goed is zijn de aangesloten bonds reeds vervangen door bilaterale signalen. Hieruit kunt u afleiden wat de ingaande en uitgaande signalen zijn. Met de effort en flow beschrijvingen van de junctie (zie sectie 5) zijn dan het optelpunt en de signaalsplitsing af te leiden. Als voorbeeld is hiernaast de omzetting van een 1 junctie gegeven.



Figuur 10: het blokschema model.

In figuur 10 is het blokschema model te zien dat van de causale bondgraaf is afgeleid. Het model kan nog vereenvoudigd worden door niet interessante losse signaalpijlen die verder niet van belang zijn, te verwijderen en de structuur aan te passen met behulp van de regel van Mason. Uit het blokschema model zijn vervolgens eenvoudig de dynamische vergelijkingen af te leiden.

## Literatuur

- [1] Breedveld, P.C., en J. van Amerongen (1994); *Dynamische Systemen: Modelvorming en Simulatie met Bondgrafen*, Open Universiteit Heerlen, ISBN: 90 358 1303 0
- [2] Controllab Products B.V. (1996), *20-sim Reference Manual, PC-version 2.0*, Controllab Products B.V., Universiteit Twente, Enschede.