

Automaten en Berekenbaarheid

Pieter Vanderschueren

Academiejaar 2023-2024

Inhoudsopgave

1	Talen en automaten	2
1.1	Wat is een taal?	2
1.2	Een algebra van talen	2
1.3	Reguliere expressies en reguliere talen	3
1.4	Niet-deterministische eindige toestandsautomaten	4
1.5	De algebra van NFA's	5
1.6	Van RE naar NFA	6
1.7	Van NFA naar RE	6
1.8	Deterministische eindige toestandsmachines	7
1.9	Myhill-Nerode relaties op Σ^*	12
1.10	Pompend lemma voor reguliere talen	14
1.11	Contextvrije talen en hun grammatica	15
1.12	Push-down automaat	18
1.13	Equivalentie van CFG en PDA	19
1.14	Pompend lemma voor contextvrije talen	19
2	Talen en berekenbaarheid	21
3	Herschrijfsystemen	22
4	Andere rekenparadigmas	23
5	Talen en complexiteit	24

1 Talen en automaten

1.1 Wat is een taal?

Definitie 1.1: String over een alfabet Σ

Een **string** over een alfabet Σ is een eindige opeenvolging van nul, één of meer elementen van Σ .

Toepassing 1.1: ϵ -compressie van een string

Als we uit een string $w \in \Sigma_\epsilon$ elk voorkomen van ϵ schrappen, wat resulteert in een nieuwe string s , dan noemen we s de ϵ -compressie van w .

Definitie 1.2: Taal L over een alfabet Σ

Een **taal** L over een alfabet Σ is een verzameling van strings over Σ .

1.2 Een algebra van talen

Definitie 1.3: Een algebra- of algebraïsche structuur

Een algebra- of algebraïsche structuur is een verzameling met daarop een aantal inwendige operaties: dikwijls binaire operaties, maar unair of met grotere ariteit kan ook. Zo wordt de verzameling van alle talen over een alfabet Σ een algebra als we als operaties unie, doorsnede, complement, etc. definiëren. Meer concreet: als L_1 en L_2 twee talen zijn, dan is

- de unie ervan een taal: $L_1 \cup L_2$
- de doorsnede ervan een taal: $L_1 \cap L_2$
- het complement ervan een taal: $\overline{L_1}$

Eigenschap 1.1: Concatenatie van twee talen

Gegeven twee talen L_1 en L_2 over hetzelfde alfabet Σ , dan noteren we de concatenatie van L_1 en L_2 als $L_1 L_2$ en definiëren we:

$$L_1 L_2 = \{xy \mid x \in L_1, y \in L_2\}$$

Eigenschap 1.2: Kleene ster van een taal

De Kleene ster van een taal wordt gedefinieerd als volgt:

$$L^* = \cup_{n \geq 0} L^n$$

Opmerking: $L^+ = LL^*$

Toepassing 1.2: Kleene ster van een alfabet

De verzameling van alle strings over een alfabet Σ is de kleene ster van het alfabet Σ^* , en volgt dus dat

$$L \in \mathcal{P}(\Sigma^*)$$

1.3 Reguliere expressies en reguliere talen

Definitie 1.4: Reguliere Expressie (RE) over een alfabet Σ

E is een **reguliere expressie** over een alfabet Σ indien E van de vorm is

- ϵ
- ϕ
- a waarbij $a \in \Sigma$
- $(E_1 E_2)$ waarbij E_1 en E_2 reguliere expressies zijn over Σ
- (E_1^*) waarbij E_1 een reguliere expressie is over Σ
- $(E_1 | E_2)$ waarbij E_1 en E_2 reguliere expressies zijn over Σ

Definitie 1.5: Reguliere taal

Een reguliere expressie E bepaalt een **reguliere taal** L_E over hetzelfde alfabet Σ als volgt:

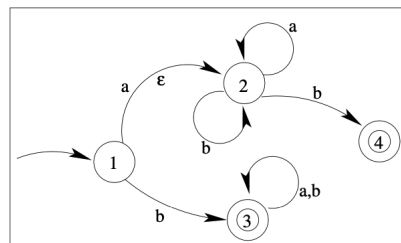
- als $E = a$ (met $a \in \Sigma$) dan is $L_E = \{a\}$
- als $E = \epsilon$ dan is $L_E = \{\epsilon\}$
- als $E = \phi$ dan is $L_E = \emptyset$
- als $E = (E_1 E_2)$ dan $L_E = L_{E_1} L_{E_2}$
- als $E = (E_1)^*$ dan $L_E = L_{E_1}^*$
- als $E = (E_1 | E_2)$ dan $L_E = L_{E_1} \cup L_{E_2}$

1.4 Niet-deterministische eindige toestandsautomaten

Definitie 1.6: Niet-deterministische eindige toestandsautomaat (NFA)

Een **niet-deterministische eindige toestandsautomaat** is een 5-tal $(Q, \Sigma, \delta, q_s, F)$ waarbij

- Q een eindige verzameling toestanden is
- Σ is een eindig alfabet
- $\delta \subseteq Q \times \Sigma_\epsilon \times Q$ is de overgangsrelatie van de automaat, wat kan worden voorgesteld in een transitietabel
- q_s is de starttoestand
- $F \subseteq Q$ is de verzameling eindtoestanden



Opmerking: In de literatuur wordt δ soms ook als een functie gedefinieerd die een toestand en een symbool afbeeldt op de verzameling van toestanden waarnaar een overgang mogelijk is:

$$\delta(q, a) = \{q' \in Q \mid (q, a, q') \in \delta\}.$$

We schrijven $p \xrightarrow{a} q$ om aan te geven dat (p, a, q) een overgang is in δ .

Definitie 1.7: Aanvaarden van strings in een NFA

Een string s wordt aanvaard door een NFA $(Q, \Sigma, \delta, q_s, F)$ indien er een sequentie $q_s = q_0 \xrightarrow{a_0} \dots \xrightarrow{a_{n-1}} q_n$ van overgangen bestaat met $q_n \in F$ zodat s de ϵ -compressie is van $a_0 \dots a_{n-1}$.

Dus: Voor toestanden p, q en string $w \in \Sigma^*$ schrijven we $p \xrightarrow{w} q$ indien er een sequentie van overgangen $p \xrightarrow{a_0} \dots \xrightarrow{a_{n-1}} q$ bestaat zodat w de ϵ -compressie is van $a_0 \dots a_{n-1}$.

Definitie 1.8: Taal L bepaald door een NFA M

Een taal L wordt bepaald door een NFA M , indien L de verzameling van strings is die M aanvaardt. We noteren de taal van M als L_M .

Definitie 1.9: Equivalentie van twee NFA's

Twee NFA's worden **equivalent** genoemd als ze dezelfde taal bepalen, m.a.w. elke equivalentieklasse van deze equivalentierelatie komt overeen met een taal.

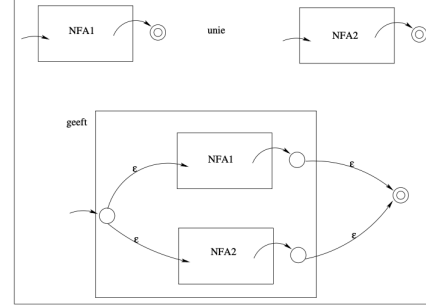
1.5 De algebra van NFA's

Eigenschap 1.3: Unie van twee NFA's

Gegeven: $i \in \{1, 2\} : \text{NFA}_i = (Q_i, \Sigma, \delta_i, q_{s_i}, \{q_{f_i}\})$

De unie $\text{NFA}_1 \cup \text{NFA}_2$ is de NFA $= (Q, \Sigma, \delta, q_s, F)$ waarbij

- $Q = Q_1 \cup Q_2 \cup \{q_s, q_f\}, F = \{q_f\}$
- δ is gedefinieerd als:
 - $\forall x \in \Sigma : \delta(q_s, x) = \emptyset \wedge \delta(q_f, x) = \emptyset$
 - $\forall q \in Q_i \setminus \{q_{f_i}\}, x \in \Sigma : \delta(q, x) = \delta_i(q, x)$
 - $\delta(q_s, \epsilon) = \{q_{s_1}, q_{s_2}\}$
 - $\delta(q_{f_i}, \epsilon) = \{q_f\}$

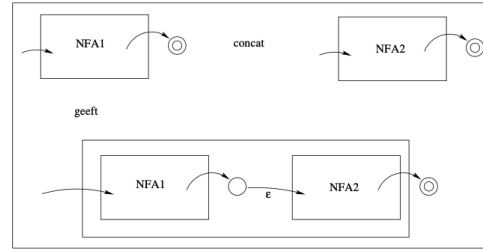


Eigenschap 1.4: Concatenatie van twee NFA's

Gegeven: $i \in \{1, 2\} : \text{NFA}_i = (Q_i, \Sigma, \delta_i, q_{s_i}, \{q_{f_i}\})$

De concatenatie $\text{NFA}_1 \text{NFA}_2$ is de NFA $= (Q, \Sigma, \delta, q_s, F)$ waarbij

- $Q = Q_1 \cup Q_2, q_s = q_{s_1}, F = \{q_{f_2}\}$
- δ is gedefinieerd als:
 - $\forall x \in \Sigma : \delta(q_{f_1}, x) = \emptyset$
 - $\forall q \in Q_i \setminus \{q_{f_1}\}, x \in \Sigma : \delta(q, x) = \delta_i(q, x)$
 - $\delta(q_{f_1}, \epsilon) = \{q_{s_2}\}$

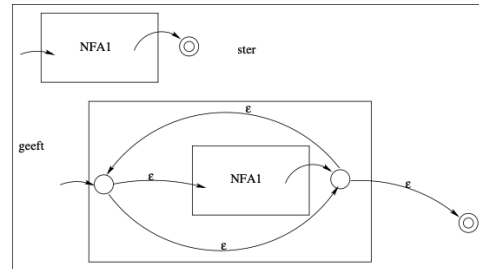


Eigenschap 1.5: Kleene ster van een NFA

Gegeven: $\text{NFA}_1 = (Q_1, \Sigma, \delta_1, q_{s_1}, \{q_{f_1}\})$

De Kleene ster NFA_1^* is de NFA $= (Q, \Sigma, \delta, q_s, F)$ waarbij

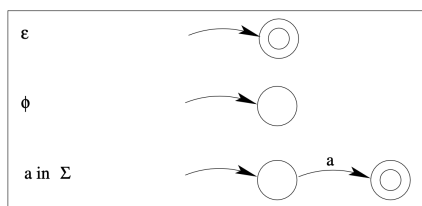
- $Q = Q_1 \cup \{q_s, q_f\}, F = \{q_f\}$
- δ is gedefinieerd als:
 - $\forall x \in \Sigma : \delta(q_s, x) = \emptyset \wedge \delta(q_f, x) = \emptyset$
 - $\forall q \in Q_1 \setminus \{q_{f_1}\}, x \in \Sigma : \delta(q, x) = \delta_1(q, x)$
 - $\delta(q_s, \epsilon) = \{q_{s_1}, q_{f_1}\}$
 - $\delta(q_{f_1}, \epsilon) = \{q_s, q_f\}$



1.6 Van RE naar NFA

Definitie 1.10: RE \rightarrow NFA

We hebben alle ingrediënten om van een reguliere expressie RE een NFA te maken, en zodanig dat de $L_{RE} = L_{NFA}$. Vermits reguliere expressies inductief gedefinieerd zijn zullen we voor elk lijntje van die definitie een overeenkomstige NFA definiëren. De drie basisgevallen ϵ , ϕ en $a \in \Sigma$ zijn triviaal te modeleren als NFA. We illustreren hieronder:



De drie recursieve gevallen beschrijven we als volgt: laat E_1 en E_2 twee reguliere expressies zijn, dan is

- $NFA_{E_1 E_2} = \text{concat}(NFA_{E_1}, NFA_{E_2})$
- $NFA_{E_1^*} = \text{ster}(NFA_{E_1})$
- $NFA_{E_1 | E_2} = \text{unie}(NFA_{E_1}, NFA_{E_2})$

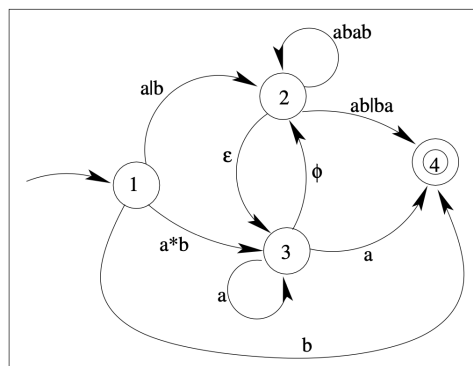
De constructie hierboven bewaart de taal, t.t.z. $L_{NFA_E} = L_E$.

1.7 Van NFA naar RE

Definitie 1.11: GNFA

Een **GNFA** is een eindige toestandsmachine met de volgende wijzigingen en beperkingen:

- er is slechts één eindtoestand en die is verschillend van de starttoestand
- vanuit de starttoestand vertrekt er juist één boog naar elke andere toestand; er komen geen bogen aan in de starttoestand
- in de eindtoestand komt juist één boog aan vanuit elke andere toestand; uit de eindtoestand vertrekken geen bogen
- voor paar p, q (let op: $p = q$ is geldig) van andere toestanden (geen start- of eindtoestand) is er juist één boog $p \rightarrow q$ en één boog $q \rightarrow p$.
- de bogen hebben als label een reguliere expressie



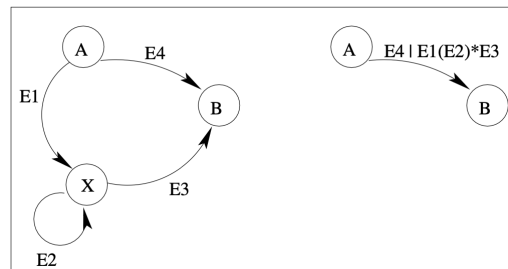
Algoritme 1.1: NFA \rightarrow RE

1. Maak van de NFA een GNFA

- Behoud alle toestanden en bogen van de NFA
- Als er meerdere bogen zijn tussen twee toestanden gelabeld met symbolen $a_1 \dots a_n$ vervang deze door één boog met als label $a_1 | \dots | a_n$
- Voer een nieuwe starttoestand in en een ϵ -boog naar de oude starttoestand
- Voer een nieuwe eindtoestand in en ϵ -bogen vanuit elke oude eindtoestand
- Voor elke boog die ontbreekt tussen twee toestanden om een GNFA te bekomen, voer een ϕ -boog in

2. Reduceer de GNFA:

Kies een willekeurige toestand X verschillend van de start- of eindtoestand, ga naar stap 3 als dit niet mogelijk is. Voor elk paar toestanden A en B (let op: $A = B$ is geldig) verschillend van X bevat de GNFA een unieke boog $A \rightarrow B$ met label E_4 , $A \rightarrow X$ met label E_1 , $X \rightarrow X$ met label E_2 en $X \rightarrow B$ met label E_3 . Vervang het label op de boog $A \rightarrow B$ door $E_4 | E_1 E_2^* E_3$. Doe dit voor alle keuzes voor A en B . Verwijder daarna de knoop X en herhaal.



3. Bepaal RE: de boog van de GNFA heeft als label de gezochte RE

Stelling 1.1: Taal herkend door een NFA

De taal herkend door de NFA is de taal van de berekende reguliere expressie, en dus bepalen de twee geziene formalismen NFA en RE precies dezelfde klasse van talen: de reguliere talen.

1.8 Deterministische eindige toestandsmachines

Definitie 1.12: Deterministische eindige toestandsmachines

Een NFA is een DFA indien δ geen ϵ -overgangen bevat en indien voor elke $p \in Q$ en elke $a \in \Sigma$ een unieke $q \in Q$ bestaat zodat $p \xrightarrow{a} q$. Het komt erop neer dat in een DFA, δ een totale functie $Q \times \Sigma \rightarrow Q$ is. Voor DFA's zullen we de unieke toestand q zodat $p \xrightarrow{a} q$ dan ook noteren als $\delta(p, a)$.

Algoritme 1.2: NFA \rightarrow DFA

Neem voor een willekeurige string $w \in \Sigma^*$ de verzameling $\{q \mid q_s \xrightarrow{w} q\}$ van toestanden bereikbaar met w . We noteren deze verzameling als q'_w . Deze verzameling dient in een DFA een singleton te zijn, dit suggereert de volgende werkwijze: we bouwen een nieuwe automaat $(Q', \Sigma, \delta', q'_s, F')$ waarvan de toestandenovereenkomen met verzamelingen van toestanden van de NFA. We construeren die zodanig dat voor elke string w geldt dat $q'_s \xrightarrow{w} q'_w$ (in de DFA), i.e. q'_w is de set van toestanden in de NFA die bereikbaar zijn vanaf de oorspronkelijke begintoestand q_s met w . We definiëren:

- Q' als de verzameling van alle deelverzamelingen q' van Q die gesloten zijn onder ϵ -bogen, dus

$$p \in q' \wedge p \xrightarrow{\epsilon} q \Rightarrow q \in q'$$

- $\delta' : Q' \times \Sigma \rightarrow Q'$ als

$$\delta'(q', a) = \{q \mid \exists p \in q' : p \xrightarrow{a} q\}$$

- q'_s als de verzameling van q_s en toestanden die bereikbaar zijn vanuit q_s met ϵ -bogen, dus

$$q'_s = \{q_s, q \mid q_s \xrightarrow{\epsilon} q\}$$

- F' als de verzameling van alle q' zodat $q' \cap F \neq \emptyset$, dus

$$F' = \{q' \in Q' \mid q' \cap F \neq \emptyset\}$$

Uit constructie volgt dat deze automaat $(Q', \Sigma, \delta', q'_s, F')$ een DFA is.

Stelling 1.2: DFA en NFA equivalentie

De geconstrueerde DFA $(Q', \Sigma, \delta', q'_s, F')$ is equivalent met de NFA $(Q, \Sigma, \delta, q_s, F)$.

Bewijs 1.1: DFA en NFA equivalentie

We moeten verifiëren dat

$$\forall w \in \Sigma^* : q'_s \xrightarrow{w} F' \Leftrightarrow q_s \xrightarrow{w} F$$

De essentie van dat bewijs is dat

$$\forall w \in \Sigma^* : q'_s \xrightarrow{w} q' \text{ (in de DFA)} \Leftrightarrow q' = q_w = \{q \mid q_s \xrightarrow{w} q\} \text{ (in de NFA)}$$

Dit is eenvoudig inductief te bewijzen gebruik makend van het feit dat $q' = q'_w \Rightarrow \delta'(q', a) = q'_{wa}$. Dan geldt dat de DFA een string w aanvaardt als voor de unieke toestand q' zodat $q'_s \xrightarrow{w} q'$ geldt dat $q' \cap F \neq \emptyset \Leftrightarrow q'_w \cap F \neq \emptyset \Leftrightarrow q_s \xrightarrow{w} F$. \square

Stelling 1.3: Taal bepaald door een DFA

De taal bepaald door een DFA is een reguliere taal.

Eigenschap 1.6: Doorsnede, verschil en complement van DFA's

Gegeven: $i \in \{1, 2\} : \text{DFA}_i = (Q_i, \Sigma, \delta_i, q_{s_i}, \{q_{f_i}\})$

We maken een generische product DFA $(Q, \Sigma, \delta, q_s, F)$ als volgt:

- $Q = Q_1 \times Q_2$
- $\delta(p \times q, x) = \delta_1(p, x) \times \delta_2(q, x)$
- $q_s = (q_{s_1}, q_{s_2})$
- Om tot een volledig definitie te komen, moeten we nog F bepalen:
 - $F = F_1 \times F_2$: de DFA is de doorsnede van de twee talen
 - $F = (F_1 \times Q_2) \cup (Q_1 \times F_2)$: de DFA is nu de unie van de twee talen
 - $\forall i \neq j \in [1, 2] : F = F_i \times (Q_j \times F_j)$: de DFA bepaalt nu de strings die tot L_i behoren, maar niet tot L_j
 - $F = (Q_1 \setminus F_1) \times (Q_2 \setminus F_2)$: de DFA bepaalt nu de strings die tot geen van beide talen behoren.

Hieruit volgt ook dat de unie, doorsnede en complement van twee reguliere talen ook regulier zijn. Daaruit volgt ook dat het complement van een reguliere taal ook regulier is, want $\bar{L} = \Sigma^* \setminus L$.

Definitie 1.13: f -string

We noemen een string s een f -string vanuit q van de DFA indien $\delta^*(q, s) \in F$, t.t.z. indien er een pad is van q naar een toestand van F die s genereert. F -gelijke toestanden zijn dan toestanden met dezelfde f -strings.

Opmerking: $q \in F \Leftrightarrow \epsilon$ is een f -string vanuit q

Definitie 1.14: f -gelijk

Twee toestanden q_1, q_2 zijn f -gelijk indien

$$\{s \in \Sigma^* \mid \delta^*(q_1, s) \in F\} = \{s \in \Sigma^* \mid \delta^*(q_2, s) \in F\}$$

In woorden, als q_1 en q_2 exact dezelfde f -strings hebben.

Eigenschap 1.7: f -gelijk

- De relatie f -gelijk is een equivalentie-relatie.
- Als p, q f -gelijk zijn dan geldt voor elk symbool a dat $\delta(p, a)$ en $\delta(q, a)$ ook f -gelijk zijn.
- Als p, q f -gelijk zijn dan geldt $p \in F \Leftrightarrow q \in F$.

Bewijs 1.2: Eigenschappen van de f -gelijk relatie

- Het is triviaal om te bewijzen dat f -gelijkheid een equivalentie-relatie is. Dit kan je doen door de reflexiviteit, symmetrie en transitiviteit van de relatie na te gaan.
- Veronderstel dat p, q f -gelijk zijn en veronderstel voor een willekeurig symbool a dat $\delta(p, a) = p', \delta(q, a) = q'$. De f -strings van p en q zijn gelijk, en dus ook hun f -strings van de vorm as . De f -strings van p' zijn de strings s zodat as een f -string is van p . Hetzelfde geldt voor q' . Bijgevolg hebben p', q' dezelfde f -strings en zijn ze dus f -gelijk.
- Als p en q f -gelijk zijn, en $p \in F$ dan is ϵ een f -string van p en dus ook van q . Aangezien er in een DFA geen ϵ -bogen zijn, is $q \in F$. Hetzelfde geldt in de andere richting. \square

Definitie 1.15: Minimale DFA

De minimale DFA is de DFA met het minimale aantal toestanden die dezelfde taal bepaalt als de oorspronkelijke DFA. Als we vertrekken van een DFA $(Q, \Sigma, \delta, q_s, F)$, dan bestaat de minimale DFA uit $(\tilde{Q}, \Sigma, \tilde{\delta}, \tilde{q}_s, \tilde{F})$ waarbij

- $\tilde{Q} = \{Q_1, \dots, Q_n\}$ waarbij de Q_i de equivalentie-klasse is van de relatie f -gelijk
- $\tilde{\delta}(Q_i, a) = Q_j$ indien een $q \in Q_i$ bestaat zodat $\delta(q, a) \in Q_j$
- \tilde{q}_s is de equivalentie-klasse Q_i zodat $q_s \in Q_i$
- \tilde{F} is de verzameling van Q_i waarvoor geldt dat $Q_i \subseteq F$.

Stelling 1.4: DFA_{min}

Een DFA_{min} is een DFA, equivalent met DFA, en alle toestanden zijn f -verschillend.

Bewijs 1.3: DFA_{min}

DFA_{min} is een DFA omdat f -gelijkheid van toestanden p en q de f -gelijkheid van $\delta(p, a)$ en $\delta(q, a)$ impliceert. Het gevolg is dat verschillende bogen met hetzelfde symbool vanuit f -gelijke p en q smelten. Om aan te tonen dat DFA en DFA_{min} equivalent zijn, is de essentiële eigenschap dat elke equivalentie-klasse Q_i en elk element $p \in Q_i$ dezelfde f -strings heeft. Dus heeft \tilde{q}_s dezelfde f -strings als q_s , en deze verzameling is dus de taal die beide DFA's bepalen. Aantonen dat een string w een f -string is van Q_i als en slechts als w een f -string is van $q \in Q_i$ gebeurt door inductie op de lengte van w , gebruikmakend van het feit dat voor elke Q_i, Q_j

$$p \in Q_i, q \in Q_j, \forall a \in \Sigma : Q_i \xrightarrow{a} Q_j \Leftrightarrow p \xrightarrow{a} q$$

Tenslotte, twee verschillende toestanden Q_i, Q_j bevatten f -verschillende toestanden. Aangezien de f -strings van Q_i en Q_j die van hun elementen zijn, zijn ze f -verschillend. \square

Algoritme 1.3: DFA \rightarrow DFA_{min}

We gaan ervoor zorgen dat de alle toestanden van de DFA f -verschillend zijn, ofwel alle f -gelijke toestanden samenvoegen tot één toestand. We beginnen uit Q^2 : dit komt neer op de veronderstelling dat alle paren f -gelijk zijn. In eerste instantie schrappen we koppels (p, q) waarvan ofwel p ofwel q behoort tot F maar niet allebei want deze koppels worden uitgesloten door de ‘enkel als’ regel. Zij zijn zeker niet f -gelijk aangezien 1 ervan ϵ afleidt en de andere niet. In tweede instantie schrappen we koppels (p, q) waarvoor een symbool a bestaat zodat $((\delta(p, a)), (\delta(q, a)))$ niet behoort tot de huidige set want ook die zijn in tegenspraak met de regel. We gaan hiermee door totdat we geen koppels meer kunnen schrappen en dus de verzameling van toestanden f -verschillend is.

Stelling 1.5: DFA_{min}

Als een DFA $N = (Q_1, \Sigma, \delta_1, q_s, F_1)$ een DFA is zonder onbereikbare toestanden en waarin elke twee toestanden f -verschillend zijn, dan bestaat er geen machine met strikt minder toestanden die dezelfde taal bepaalt. De DFA N is dan een minimale DFA of DFA_{min} voor deze taal.

Bewijs 1.4: DFA_{min}

Veronderstel dat $Q_1 = \{q_s, q_1, \dots, q_n\}$ waarbij q_s de starttoestand is, stel dat $N_2 = (Q_2, \Sigma, \delta_2, q_s, F_2)$ een DFA is met minder toestanden dan N . Vermits in N elke toestand bereikbaar is, bestaan er strings $\forall i \in \mathbb{N}_0^+ : s_i$ zodanig dat $\delta_1^*(q_s, s_i) = q_i$. Vermits N_2 minder toestanden heeft moet voor een $i \neq j : \delta_2^*(p_s, s_i) = \delta_2^*(p_s, s_j)$. Vermits q_i en q_j f -verschillend zijn, is er een string s zodat $\delta_1^*(q_i, s) \in F_1$ en $\delta_1^*(q_j, s) \notin F_1$ of omgekeerd. Dus ook $\delta_1^*(q_s, s_i s) \in F_1$ en $\delta_1^*(q_s, s_j s) \notin F_1$ of omgekeerd. Dit betekent dat DFA₁ van de strings $s_i s$ en $s_j s$ er juist één accepteert. Maar N_2 zal beide strings $s_i s$ en $s_j s$ accepteren of geen van beiden, aangezien het parsen van s_i en s_j naar dezelfde node leidt, waarna hetzelfde pad gevolgd wordt om v te parsen. Dus kunnen de DFA's N en N_2 niet dezelfde taal bepalen. \square

Definitie 1.16: DFA isomorfisme

Een DFA $N_1 = (Q_1, \Sigma, \delta_1, q_{s_1}, F_1)$ is **isomorf** met een DFA $N_2 = (Q_2, \Sigma, \delta_2, q_{s_2}, F_2)$ als er een bijectie $b : Q_1 \rightarrow Q_2$ bestaat zodanig dat

- $b(F_1) = F_2$
- $b(q_{s_1}) = q_{s_2}$
- $b(\delta_1(q, a)) = \delta_2(b(q), a)$

Twee isomorfe DFA's bepalen dus dezelfde taal.

Opmerking: een minimale DFA is dus altijd uniek op isomorfisme na, sinds elke twee minimale DFA's van een DFA (op een isomorfisme na) dezelfde componenten hebben.

1.9 Myhill-Nerode relaties op Σ^*

Definitie 1.17: Fijnheid van partities

Een partitie P_1 is **fijner** dan een partitie P_2 indien

$$\forall x \in P_1, \exists y \in P_2 : x \subseteq y$$

Het omgekeerde van fijn is **grof**.

Definitie 1.18: \sim_{DFA}

Voor een DFA $N = (Q, \Sigma, \delta, q_s, F)$ definiëren we de relatie \sim_{DFA} op Σ^* als volgt:

$$x \sim_{\text{DFA}} y \Leftrightarrow \delta^*(q_s, x) = \delta^*(q_s, y)$$

In woorden: er geldt $x \sim_{\text{DFA}} y$ als en slechts als het parsen van x en y vanuit q_s leidt tot dezelfde toestand q , dus $x, y \in \text{reach}(q)$.

Eigenschap 1.8: \sim_{DFA}

- Rechts congruentie van \sim : $\forall x, y \in \Sigma^*, a \in \Sigma : x \sim y \Rightarrow xa \sim ya$
- het aantal equivalentieklassen van \sim is eindig, m.a.w. \sim heeft een eindige index
- \sim verfijnt \sim_L , of: $x \sim y \Rightarrow x \sim_L y$

Definitie 1.19: Myhill-Nerode relatie

Een equivalentierelatie \sim tussen strings is een **Myhill-Nerode relatie** $\text{MN}(L)$ voor een taal L als de equivalentieklasse voldoet aan **bovenstaande** eigenschappen.

Stelling 1.6: DFA_{\sim}^L

Gegeven een taal L over Σ en een $\text{MN}(L)$ -relatie \sim op Σ^* , dan is $\text{DFA}_{\sim}^L = (Q, \Sigma, \delta, q_s, F)$ een DFA die L bepaalt, waarbij

- $Q = \{x_{\sim} \mid x \in \Sigma^*\}$: elke equivalentieklasse is een toestand
- $\delta(x_{\sim}, a) = (xa)_{\sim}$
- $q_s = \epsilon_{\sim}$: de starttoestand bereik je met ϵ
- $F = \{x_{\sim} \mid x \in L\}$: de eindtoestanden worden bereikt door een string in L

Bewijs 1.5: DFA_{\sim}^L

Dat δ goed gedefinieerd is, kan je bewijzen door gebruik te maken van de rechtse congruentie van \sim . Verder zijn alle ingrediënten van de DFA duidelijk, in het bijzonder ook dat Q slechts een eindig aantal toestanden bevat. We moeten nog bewijzen dat $L_{\text{DFA}_{\sim}^L} = L$:

$$x \in L_{\text{DFA}_{\sim}^L} \Leftrightarrow \delta^*(q_s, x) \in F \Leftrightarrow x_{\sim} \in F \Leftrightarrow x \in L$$

De middelste overgang bekom je door met inductie op de lengte van de string x te bewijzen dat $\delta^*(\epsilon_{\sim}, x) = (x)_{\sim}$. \square

Stelling 1.7: \sim_{DFA} en \sim zijn elkaars inverse

Voor elke taal L geldt dat de functie die DFA's van L afbeeldt op de overeenkomstige $\text{MN}(L)$ -relatie \sim_{DFA} en de functie die $\text{MN}(L)$ -relaties \sim afbeeldt op de overeenkomstige DFA_{\sim}^L , elkaars inversen zijn op een DFA-isomorfisme na.

Stelling 1.8: Infimumrelatie van Myhill-Nerode relaties

Als E een niet lege verzameling van $\text{MN}(L)$ relaties is, dan is ook het infimum \sim_{inf} van E een $\text{MN}(L)$ relatie. \sim_{inf} is de transitieve sluiting van de unie van E . Dit betekent dat

$$x \sim_{\text{inf}} y \Leftrightarrow i \in [0, n-1], \sim_i \in E : x = x_0 \sim_0 x_1 \sim_1 \dots \sim_{n-1} x_n = y$$

Bewijs 1.6: Infimumrelatie van Myhill-Nerode relaties

- **Eindigheid:** \sim_{inf} is een superset van elke willekeurige $\sim \in E$ en heeft dus minder equivalentie-klasse dan \sim . Elke \sim heeft slechts een eindig aantal equivalentieklasse, zodoende ook \sim_{inf} .
- **Rechts congruentie:** Stel $x \sim_{\text{inf}} y$ dan bestaat de sequentie

$$x = x_0 \sim_0 x_1 \sim_1 \dots \sim_{n-1} x_n = y$$

Aangezien elke \sim_i rechts congruent is, geldt voor elke $a \in \Sigma$ dat

$$xa = x_0 a \sim_0 x_1 a \sim_1 \dots \sim_{n-1} x_n a = ya$$

Bijgevolg geldt dat $xa \sim_{\text{inf}} ya$ en dus dat \sim_{inf} rechts congruent is.

- **Verfijnen van \sim_L :** Stel $x \sim_{\text{inf}} y$ zodat er een sequentie bestaat

$$x = x_0 \sim_0 x_1 \sim_1 \dots \sim_{n-1} x_n = y$$

Aangezien elke \sim_i een verfijning is van \sim_L , geldt

$$x_0 \in L \Leftrightarrow x_1 \in L \Leftrightarrow \dots \Leftrightarrow x_n \in L$$

We bekomen $x \in L \Leftrightarrow y \in L$ en dus dat \sim_{inf} een verfijning is van \sim_L . \square

Stelling 1.9: MN(L) toebehorend aan een mininale DFA

De DFA van \sim_{inf} , $\text{DFA}_{\sim_{\text{inf}}}$, is een mininale DFA_{min} van L . Elke mininale DFA is van L is isomorf met mekander, en dus ook met $\text{DFA}_{\sim_{\text{inf}}}$.

Bewijs 1.7: MN(L) toebehorend aan een mininale DFA

Voor elke MN(L) relatie \sim geldt ofwel dat $\sim = \sim_{\text{inf}}$, ofwel bestaan x, y zodat $x \approx y$ maar $x \not\sim_{\text{inf}} y$, en dan heeft \sim strikt meer equivalentieklassen dan \sim_{inf} . Uit de overeenkomst tussen DFA's en MN(1) relaties volgt dat elke DFA die L bepaalt, ofwel isomorf is aan DFA_{sup} , de DFA van \sim_{inf} , ofwel heeft hij strikt meer toestanden dan DFA_{sup} . Dus, $\text{DFA}_{\sim_{\text{inf}}}$ is een mininale DFA van L waarmee elke mininale DFA van L isomorf is. \square

Eigenschap 1.9: MN(L) toebehorend aan een mininale DFA

Het kan nu ook bewezen worden dat de MN(L) relatie die hoort bij de mininale DFA voldoet aan:

$$x \sim_{\text{inf}} y \Leftrightarrow \forall s \in \Sigma^* : (xs \in L \Leftrightarrow ys \in L)$$

Het is een vorm van f -gelijkheid gedefinieerd op strings in plaats van op toestanden.

Stelling 1.10: Stelling van Myhill-Nerode

Laat $L \subseteq \Sigma^*$ een taal zijn over Σ . De volgende drie uitspraken zijn dan equivalent:

- $\Leftrightarrow L$ is regulier
- \Leftrightarrow er bestaat een Myhill-Nerode relatie voor L
- \Leftrightarrow definieer \sim op Σ^* als volgt:

$$x \sim y \Leftrightarrow \forall s \in \Sigma^* : (xs \in L \Leftrightarrow ys \in L);$$

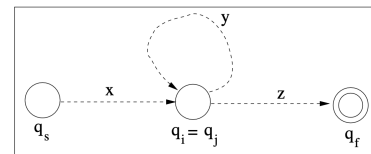
de relatie \sim heeft een eindige index

1.10 Pomp lemma voor reguliere talen

Stelling 1.11: Pomp lemma voor reguliere talen

Voor een reguliere taal L bestaan een pomplengte d , zodanig dat als $s \in L$ en $|s| \geq d$, dan bestaat er een verdeling van s in stukken x, y en z zodanig dat $s = xyz$ en

- $\forall i \in \mathbb{N}_0^+ : xy^iz \in L$
- $|y| > 0$
- $|xy| \leq d$



Bewijs 1.8: Pumpend lemma voor reguliere talen

Neem een DFA die L bepaalt, neem $d = \#Q$ en neem een willekeurige $s = a_1 \dots a_n \in L$ met $n \geq d$. Beschouw de accepterende sequentie

$$q_s = q_0 \xrightarrow{a_1} q_1 \xrightarrow{a_2} \dots \xrightarrow{a_n} q_n \in F$$

Deze rij van toestanden heeft lengte $n+1$, wat strikt groter is dan d . Neem de eerste $d+1$ toestanden van de deze rij, dus q_0, \dots, q_d . Er zijn maar d verschillende toestanden, dus er zijn twee gelijke toestanden. Stel dat $q_i = q_j$ met $0 \leq i < j \leq d$, dan nemen we $x = a_1 \dots a_i$, $y = a_{i+1} \dots a_j$ en z de rest van de string. Alles volgt nu direct, zie desnoods te illustratie in de stelling. \square

1.11 Contextvrije talen en hun grammatica

Definitie 1.20: Contextvrije grammatica - CFG

Een contextvrije grammatica is een 4-tal (V, Σ, R, S) waarbij

- V een eindige verzameling is van niet-eindsymbolen of **variabelen**
- Σ een eindige alfabet is van eindsymbolen of **terminals**, disjunct met V
- R is een eindige verzameling van regels of **producties**: een regel is een koppel van één niet-eindsymbool en een strings van elementen uit $V \cup \Sigma_\epsilon$. We schrijven $u \rightarrow v$ voor een regel (u, v) .
- $S \in V$ is het **startsymbool**

Definitie 1.21: Taal bepaald door een CFG

De taal L_{CFG} bepaald door een CFG (V, Σ, R, S) is de verzameling strings s over Σ zodanig dat $S \Rightarrow^* s$. In formulevorm:

$$L = \{w \in \Sigma^* \mid S \Rightarrow^* w\}$$

Definitie 1.22: Afleiding m.b.v. een CFG

Gegeven een CFG (V, Σ, R, S) . Een string f over $V \cup \Sigma_\epsilon$ wordt afgeleid uit een string b over $V \cup \Sigma_\epsilon$ m.b.v. de CFG als er een eindige rij strings s_0, \dots, s_n bestaat zodanig dat

- $s_0 = b$
- $s_n = f$
- $\forall i \in [0, n-1] : s_i \rightarrow s_{i+1}$

We noteren: $s_i \Rightarrow s_{i+1}$ en $b \Rightarrow^* f$.

Eigenschap 1.10: Implementaties van afleidingen m.b.v. een CFG

- **diepte-eerst**: bij elke overgang i is het vervangen symbool X de grootste index heeft van alle niet-terminaal symbool in s_i . Dit is een **niet-deterministische** strategie.
- **links-eerst**: bij elke overgang i is het vervangen symbool X het meest linkse niet-terminaal symbool in s_i . Een links-eerst strategie is ook een diepte-eerst strategie, maar niet noodzakelijk omgekeerd.
- **breedte-eerst**: bij elke overgang i is het vervangen symbool X de kleinste index heeft van alle niet-terminaal symbool in s_i . Dit is een **niet-deterministische** strategie.
 - breedte-eerst, linkst eerst: bij elke overgang i is het vervangen symbool X het meest linkse symbool met kleinste index heeft van alle niet-terminaal symbool in s_i .

Eigenschap 1.11: Ambigüiteit van een CFG

Een CFG is ambigu indien er strings bestaan die meerdere meest-linkse parsings bezitten.

Definitie 1.23: Equivalente CFG's

Twee contextvrije grammatica's CFG_1 en CFG_2 zijn **equivalent** als ze dezelfde taal bepalen, en dus $L_{CFG_1} = L_{CFG_2}$.

Definitie 1.24: Contextvrije taal - CFL

Een taal L is **contextvrij** indien er een CFG bestaat die L bepaalt, en dus $L = L_{CFG}$.

Opmerking: niet elke CFL heeft een niet-ambigue CFG

Definitie 1.25: Chomsky normaalvorm

Een CFG (V, Σ, R, S) heeft de **Chomsky normaalvorm** als elke regel één van de volgende vormen heeft:

- $A, B, C \in V : A \rightarrow BC$
- $A \in V, \alpha \in \Sigma : A \rightarrow \alpha$
- $S \rightarrow \epsilon$

Stelling 1.12: Equivalente Chomsky normaalvorm

Voor elke CFG (V, Σ, R, S) bestaat er een equivalentie CFG in Chomsky normaalvorm.

Bewijs 1.9: Equivalente Chomsky normaalvorm

We vertrekken van een willekeurige CFG en transformeren hem terwijl we equivalentie bewaren naar Chomsky Normaalvorm.

1. Vervang alle voorkomens van S door een nieuw symbool X , en daarna voeg de regel $S \rightarrow X$ toe. Zo komt S enkel links voor. Zo wordt 1 van de voorwaarden voldaan. Deze stap is evident equivalentiebewarend.
2. Neem de verzameling van alle regels. Itereer de volgende operatie zo lang tot een fixpunt bereikt wordt:

- Selecteer een regel $A \rightarrow \epsilon$ en een regel $B \rightarrow \alpha A \beta$.
- Voeg de regel $B \rightarrow \alpha \beta$ toe.

Deze stap is equivalentiebewarend. Daarvoor moet aangetoond worden dat elke iteratie equivalentiebewarend is. Kortom, als $B \rightarrow \alpha A \beta$ toegevoegd wordt, dan kan een string geschreven worden met die regel als en slechts als de strings geschreven kan worden zonder deze regel. Het is evident omdat het herschrijven met $B \rightarrow \alpha \beta$ kan gesimuleerd worden met $B \rightarrow \alpha A \beta$ en $A \rightarrow \epsilon$. Tenslotte: verwijder alle regels $A \rightarrow \epsilon$ voor $A \neq S$. Ook deze stap is equivalentiebewarend. Neem een parsing boom $S \rightarrow \dots$; de wortel is S , elke node is gelabeld met een symbool A , elke node die geen blad is heeft een geordende rij kinderen gelabeld $BC \dots D$ zodat $A \rightarrow BC \dots D$ een regel is, en de bladeren van de bomen vormen een sequentie van terminale symbolen. Dan is het vrij duidelijk dat elke string van de CFL zo'n parsing boom heeft. Ook dat deze boom kan hervormd worden tot een boom die gebruik maakt van de toegevoegde regels en geen gebruik maakt van regels $A \rightarrow \epsilon$.

3. Nu willen we afgeraken van de regels van de vorm $A \rightarrow B$. Voor een regel van de vorm $\mathcal{E} = A \rightarrow B$ en een regel van de vorm $\mathcal{R} = B \rightarrow \gamma$, definieer de regel $\mathcal{U}(\mathcal{E}, \mathcal{R}) = A \rightarrow \gamma$. Zolang er regels van de vorm $\mathcal{E} = A \rightarrow B$ zijn (waaron B ook een niet-terminal is) en regels van de vorm $\mathcal{R} = B \rightarrow \gamma$ zijn, voeg de regel $\mathcal{U}(\mathcal{E}, \mathcal{R})$ toe. Nadat dit eindigt, verwijderen we uit de bekomen grammatica alle regels van de vorm $A \rightarrow B$. Deze stap is equivalentiebewarend. Neem een string s die kan afgeleid worden met de regels van de vorm $A \rightarrow B$. Dan kan s ook afgeleid worden zonder deze regels.
4. We hebben nu nog drie soorten regels te behandelen:
 - (a) $A \rightarrow \gamma$ waar γ uit juist twee niet-eindsymbolen bestaat.
 - (b) $A \rightarrow \gamma$ waar γ uit minstens twee symbolen bevat: vervang elke terminal a door een niet-terminaal A_a en voeg de regel $A_a \rightarrow a$ toe.
 - (c) eventueel $S \rightarrow \epsilon$: die mag blijven.

5. De regels van de vorm

$$n > 2 : A \rightarrow X_1 X_2 \dots X_n$$

vervang je door

$$A \rightarrow X_1 Y_1, Y_1 \rightarrow X_2 Y_2, \dots, Y_{n-2} \rightarrow X_{n-1} X_n$$

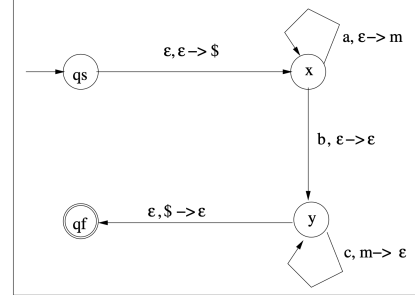
Hierbij is het duidelijk dat bij de transformatie naar de Chomsky Normaalvorm de grammatica equivalent blijft. \square

1.12 Push-down automaat

Definitie 1.26: Push-down automaat

Een push-down automaat PDA $(Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_s, F)$ is een automaat waarbij

- Q is een eindige verzameling toestanden
- Σ is een eindig inputalfabet
- Γ is een eindig stapelalfabet
- $\delta : Q \times \Sigma_\epsilon \times \Gamma_\epsilon \rightarrow \mathcal{P}(Q \times \Gamma_\epsilon)$
- q_s is de starttoestand
- $F \subseteq Q$ is een verzameling eindtoestanden



Opmerking: de bedoeling van een label zoals $\alpha, \beta \rightarrow \gamma$ op een boog is

- indien α het eerste symbool is van de huidige string
- en β staat op de top van de stapel
- volg dan de boog en
 - verwijder α van de string
 - verwijder β van de string
 - zet γ op de stapel

waarbij $\alpha, \beta, \gamma \in \Sigma_\epsilon$.

Definitie 1.27: Aanvaarding van een string s door een PDA

Een string s wordt aanvaard door een PDA indien s kan worden opgesplitst in delen $i \in [1, m] : w_i \in \Sigma_\epsilon$, er toestanden $j \in [0, n] : q_j$ zijn en stacks $k \in [0, m] : \text{stack}_k \in \Gamma^*$, zodanig dat

- $\text{stack}_0 = \epsilon$: de stack is leeg in het begin
- $q_0 = q_s$: we vertrekken in de begintoestand
- $q_m \in F$: we komen aan in een eindtoestand met een lege string
- $x, y \in \Gamma_\epsilon : (q_{i+1}, y) \in \delta(q_i, w_{i+1}, x)$ en $x, y \in \Gamma_\epsilon, t \in \Gamma^* : \text{stack}_i = xt, \text{stack}_{i+1} = yt$

Definitie 1.28: Taal bepaald door een PDA

De taal L bepaald door een PDA bestaat uit alle strings die door de PDA aanvaard worden.

1.13 Equivalentie van CFG en PDA

Stelling 1.13: Equivalentie van CFG en PDA

Elke push-down automaat bepaalt een contextvrije taal en elke contextvrije taal wordt bepaald door een push-down automaat. We onderscheiden de twee gevallen:

- CFG \rightarrow PDA: We kunnen een PDA bouwen voor een CFG met drie toestanden q_s, x, q_f waarbij q_s de starttoestand is, q_f de unieke eindtoestand is en x een toestand is die enkel dient om de stack te legen. De transitie bestaat uit 4 soorten overgangen:
 - $\delta(q_s, \epsilon, \epsilon) = (x, S\$)$, met S het startsymbool van de CFG,
 - $\delta(x, \epsilon, X) = (x, \gamma)$, voor elke regel $X \rightarrow \gamma$ van de CFG,
 - $\delta(x, A, A) = (x, \epsilon)$ voor elk terminaal symbool A ,
 - $\delta(x, \epsilon, \$) = (q_f, \epsilon)$.
- PDA \rightarrow CFG: We kunnen een CFG (V, Σ, R, S) maken uit een PDA $(Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_s, F)$ waarbij
 - $\forall p, q \in Q : V = A_{p,q}$
 - $S = A_{q_s, q_f}$
 - R bestaat uit 3 delen:
 1. $\forall p \in Q : A_{p,p} \rightarrow \epsilon$
 2. $\forall p, q, r \in Q : A_{p,q} \rightarrow A_{p,r} A_{r,q}$
 3. $\forall p, q, r, s \in Q, a, b \in \Sigma_\epsilon, t \in \Gamma, (r, t) \in \delta(p, a, \epsilon), (q, \epsilon) \in \delta(s, b, t) : A_{p,q} \rightarrow a A_{r,s} b$

Eigenschap 1.12: Equivalentie van CFG en PDA

- als een taal door een PDA wordt bepaald, dan is die contextvrij.
- elke reguliere taal is contextvrij, want elke NFA is een PDA waarbij de stapel niet gebruikt wordt.

1.14 Pombend lemma voor contextvrije talen

Stelling 1.14: Pombend lemma voor contextvrije talen

Voor een contextvrije taal L bestaan een getal p (de pomplengte) zodanig dat elke string s van L met lengte strikt groter dan p kan opgedeeld worden in 5 stukken $u, v, x, y, z \in \Sigma^*$ zodanig dat $s = uvxyz$

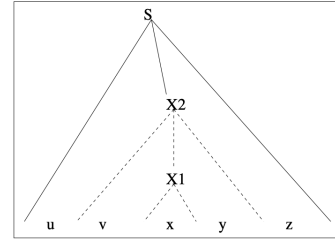
- $\forall i \in \mathbb{N}_0^+ : uv^i xy^i z \in L$
- $|vy| > 0$
- $|vxy| \leq p$

Bewijs 1.10: Pombend lemma voor contextvrije talen

Als L eindig is dan is de stelling triviaal voldaan. Immers, dan heeft L een langste string s ; neem $p = |s|$. Dan zijn er geen strings met lengte strikt groter dan p , en dan is de stelling triviaal voldaan. Veronderstel dus dat L oneindig is en bijgevolg strings van willekeurige lengte bevat en dat de CFG voor L in Chomsky normaalvorm is, dit is makkelijker en immers elke CFG heeft een equivalente CFG in Chomsky normaalvorm. Dus, elke regel heeft nu ofwel twee ofwel nul niet-terminalen aan de rechterkant, en het startsymbool S komt niet rechts voor. Laat het aantal niet-eindsymbolen in de CFG gelijk aan n zijn. We willen nu aantonen dat

- er een pomplengte p bestaat zodat de parse tree van elke string van lengte strikt groter dan p , een tak bevat met een herhaald niet-terminaal symbool X ;
- als de parse tree van s een tak bevat met een herhaald niet-terminaal symbool X , dan is s van de vorm $uvxyz$ zodat s kan gepompt worden.

Voor de eerste stap gebruiken we het duivenhokprincipe, maar nu op de parse tree voor voldoende lange strings. De grootste parse tree van de CFG zonder takken met herhaalde niet-terminalen, bevat enkel paden met maximaal n niet-terminalen. Aangezien elke niet-terminale node hoogstens 2 kinderen heeft, bevat een dergelijke boom hoogstens 2^{n-1} bladeren. De string bevat evenveel symbolen als er bladeren zijn, dus hoogstens 2^{n-1} . Neem de pomp lengte $p = 2^{n-1}$. Zij s een string in L van meer dan p symbolen. De parse tree bevat dus een tak met meer dan n niet-eindsymbolen. We selecteren een langste pad in deze parse tree (mogelijks bestaat er meer dan 1 langste pad). Dit pad bevat meer dan n niet-terminalen en dus wordt een niet-terminaal herhaald. Zij X het herhaalde symbool op dat pad met het laagste voorlaatste voorkomen. Het laagste voorkomen van X duiden we aan door X_1 en het voorlaatste voorkomen door X_2 . We kunnen nu uit die parse tree (zie figuur) een afleiding construeren waarvan we enkel wat tussenstappen laten zien



$$u, v, x, y, z \in \Sigma^* : S \Rightarrow^* uX_2z \Rightarrow^* uvX_1yz \Rightarrow^* uvxyz$$

waarbij v en y niet tegelijkertijd leeg zijn. Vermits dit een geldige afleiding is, is

$$S \Rightarrow^* uX_2z \Rightarrow^* uxz$$

dat ook en ook

$$S \Rightarrow^* uXz \Rightarrow^* uvXyz \Rightarrow^* uvvxyyz$$

is er eentje en ..., hierbij zijn de eerste twee voorwaarden bewezen van de stelling.

We besluiten nu ook de laatste: vxy wordt afgeleid door de deelboom onder X_2 . Het deel van het geselecteerde pad onder X_2 is een langste pad van deze deelboom. Dit deelpad is hoogstens n lang (het bestaat enkel uit niet-eindsymbolen, bevat niet S , en bevat exact 1 herhaald symbool X). Het aantal bladeren van deze deelboom, en dus de lengte van vxy is dus hoogstens $2^{n-1} \leq p$, waarbij de laatste voorwaarde ook bewezen is.

□

2 Talen en berekenbaarheid

3 Herschrijfsystemen

4 Andere rekenparadigmas

5 Talen en complexiteit