Aanvullingen cursus A&B

Academiejaar 2024-2025

Vincent Van Schependom

Pagina 11, bewijs subalgebra:

Stelling. RegLan is een subalgebra van L_Σ voor de operaties *unie*, *concatenatie*, *Kleene** en *complement.*

Bewijs. We bewijzen de stelling voor elke operatie apart:

- Unie:
  Zij $E_1, E_2 \in$ RegExp de reguliere expressies die respectievelijk de talen L_{E_1} en L_{E_2} bepalen, met dus duidelijk $L_{E_1}, L_{E_2} \in$ RegLan. Omdat de unie van beide talen wordt bepaald door een reguliere expressie, namelijk door $(E_1|E_2)$, geldt dat $(L_{E_1} \cup L_{E_2}) \in$ RegLan. We besluiten dat de operatie *unie* inwendig is voor de subalgebra gevormd door RegLan.

- Concatenatie:
  Beschouw L_{E_1} en L_{E_2} zoals hierboven beschreven. Omdat de concatenatie van beide reguliere talen wordt bepaald door een reguliere expressie, namelijk door (E_1E_2), geldt dat $(L_{E_1}L_{E_2}) \in$ RegLan. We besluiten dat de operatie *concatenatie* inwendig is voor de subalgebra gevormd door RegLan.

- Kleene*
  Beschouw L_{E_1} zoals hierboven beschreven. Omdat de Kleene* van deze reguliere taal wordt bepaald door een reguliere , namelijk door $(E_1)^*$, geldt dat $L_1^* \in$ RegLan. We besluiten dat de operatie *Kleene** inwendig is voor de subalgebra gevormd door RegLan.

- Complement
  Beschouw de reguliere taal L_{E_1} zoals hierboven beschreven. Ze wordt bepaald door de reguliere expressie E_1. Omdat reguliere expressies en NFA's equivalent zijn, kunnen we een NFA N bouwen die dezelfde taal bepaalt als E_1. Elke NFA kan omgezet worden in een equivalente DFA, dus dat kunnen we ook hier doen. In de equivalente DFA D (die dus ook L_{E_1} bepaalt) maken we niet-aanvaarde toestanden van alle aanvaarde**nde** toestanden en vice versa. De bekomen DFA D' bepaalt nu het complement van L_{E_1}. We gaan vervolgens omgekeerd te werk: we bouwen een RE op vanuit D', door eerst een GNFA te maken en die vervolgens te reduceren tot deze slechts 2 toestanden meer heeft. Tot slot lezen we de reguliere expressie af op de (unieke) boog tussen de start- en eindknoop. De GNFA bepaalt nog steeds $\bar{L}_{E_1}$, want deze taal werd ook door de DFA D' herkend en het procédé paste de taal niet aan. We hebben dus de RE gevonden die het complement van een willekeurige reguliere taal bepaalt. Dit wil precies zeggen dat $\bar{L}_{E_1} \in$ RegLan, of nog: ook de operatie *complement* is inwendig voor de subalgebra gevormd door RegLan.

  Alternatief: maak een generische product DFA die $\bar{L} = \Sigma^* \setminus L$ bepaalt:

  - DFA_1 is de DFA die Σ^* bepaalt: hij bevat 1 (aanvaardende) toestand, waar twee bogen toekomen: de startboog en de cyclische boog met daarop alle symbolen uit het alfabet.
  - DFA_2 is de DFA die L bepaalt.
  - $Q = Q_1 \times Q_2$
  - $\delta(p \times q, x) = \delta_1(p, x) \times \delta_2(q, x) \quad \Leftrightarrow \quad \delta((p, q), x) = (\delta_1(p, x), \delta_2(q, x))$
  - $q_s = (q_{s1}, q_{s2})$
  - $F = F_1 \times (Q_2 \setminus F_2)$

$\square$

Pagina 15, zelf doen 4:

Construeer $M' = (Q', \Sigma, \delta', q'_s, F')$:

- $Q' = Q \cup \{q'_s\}$
- $F' = \{q_s\}$
- Draai alle bogen in M om
- Voeg een ε-boog toe vanuit q'_s naar elke $q_{e,i} \in F$

Deze NFA bepaalt de omgekeerde taal van $L = L_M$.

Pagina 18-20, de algebra van NFA's

Gegeven $\text{NFA}_1 = (Q_1, \Sigma, \delta_1, q_{s1}, \{q_{f1}\})$ en $\text{NFA}_2 = (Q_2, \Sigma, \delta_2, q_{s2}, \{q_{f2}\})$.

De concatenatie NFA_1NFA_2 is de NFA $= (Q, \Sigma, \delta, q_s, \{q_f\})$ waarbij

- $Q = Q_1 \cup Q_2$
- $q_s = q_{s1}$
- $F = \{q_{f2}\}$
- δ gedefinieerd als:

$$\begin{aligned} &\delta(q_{f1}, x) = \emptyset && \forall x \in \Sigma \\ &\delta(q_{f1}, \varepsilon) = q_{s2} && \\ &\delta(q, x) \quad = \delta_1(q, x) && \forall q \in Q_1 \setminus \{q_{f1}\}, \forall x \in \Sigma_\varepsilon \\ &\delta(q, x) \quad = \delta_2(q, x) && \forall q \in Q_2, \forall x \in \Sigma_\varepsilon \end{aligned}$$

  Hierbij moet de eerste regel eigenlijk niet expliciet worden vermeld. We zijn hier bezig met NFA's, dus als er geen overgangsregel voor een bepaald symbool x gedefinieerd is, wordt er vanuit gegaan dat $\delta(q, x) = \emptyset$.

De ster $(\text{NFA}_1)^*$ is de NFA $= (Q, \Sigma, \delta, q_s, \{q_f\})$ waarbij

- $Q = Q_1 \cup \{q_s, q_f\}$
- $F = \{q_f\}$
- δ gedefinieerd als:

$$\begin{aligned} &\delta(q_s, x) \quad = \emptyset && \forall x \in \Sigma \\ &\delta(q_s, \varepsilon) \quad = \{q_{s1}, q_{f1}\} && \\ &\delta(q_{f1}, \varepsilon) = \{q_s, q_f\} && \\ &\delta(q_{f1}, x) = \emptyset && \forall x \in \Sigma \\ &\delta(q, x) \quad = \delta_1(q, x) && \forall q \in Q_1 \setminus \{q_{f1}\}, \forall x \in \Sigma_\varepsilon \end{aligned}$$

Pagina 21, bewijs structurele inductie

Stelling. Onderstaande constructie bewaart de taal, t.t.z. $L_{\text{NFA}_E} = L_E$

- $\text{NFA}_{E_1E_2} = \text{concat}(\text{NFA}_{E_1}, \text{NFA}_{E_2})$
- $\text{NFA}_{E_1^*} = \text{ster}(\text{NFA}_{E_1})$
- $\text{NFA}_{E_1|E_2} = \text{unie}(\text{NFA}_{E_1}, \text{NFA}_{E_2})$

Bewijs. We bewijzen eerst volgende hulpstellingen:

- De concatenatie van NFA_1 en NFA_2 bepaalt $L_{\text{NFA}_1}L_{\text{NFA}_2}$:

  We voeren volgende notatie in:

  $$\text{NFA } C = \text{concat}(\text{NFA}_1, \text{NFA}_2)$$

  Volgens de definitie van de concatenatie van twee talen geldt dat

  $$L_{\text{NFA}_1}L_{\text{NFA}_2} = \{xy \mid x \in L_{\text{NFA}_1}, y \in L_{\text{NFA}_2}\}$$

  We moeten bewijzen dat

  $$s \in L_C \Leftrightarrow s \in L_{\text{NFA}_1}L_{\text{NFA}_2}$$

  $\Rightarrow$ Neem aan dat $s \in L_C$. Bij het parsen van deze string s met de machine C zullen we op een gegeven moment gegarandeerd in de toestand q_{f1} terechtkomen, aangezien dat de enige toestand is van waaruit we naar de machine NFA_2 kunnen geraken. Dit gebeurt door een ε-boog te nemen naar q_{s2}. Noem de string die geparst is tijdens deze eerste fase x en neem de ε-boog van q_{f1} naar q_{s2}. Er blijft – vanuit deze starttoestand van NFA_2 – een string y over. Na het parsen van deze string y komen we in de toestand q_{f2} terecht, want $s \in L_C$ en de enige (ε-)boog naar q_f vertrekt vanuit deze toestand. Omdat $x \in L_{\text{NFA}_1}$ (na het parsen van x belanden we in een aanvaardende toestand q_{f1} van NFA_1) en $y \in L_{\text{NFA}_2}$ (analoog), geldt dat $s = xy \in L_{\text{NFA}_1}L_{\text{NFA}_2}$.

  $\Leftarrow$ Als de string $s \in L_{\text{NFA}_1}L_{\text{NFA}_2}$, dan bestaat s uit twee substrings, zodat $s = xy$ met $x \in L_{\text{NFA}_1}$ en $y \in L_{\text{NFA}_2}$. Dat wil zeggen dat bij het doorlopen van C, we vanuit q_s in een eindig aantal stappen in q_{f1} terechtkomen. Van hieruit nemen we een ε-boog naar de begintoestand van NFA_2. Vervolgens bereiken we na nog een eindig aantal extra stappen de toestand q_{f2}, van waaruit we een ε-boog nemen naar de aanvaardende toestand q_f. Hiermee hebben we aangetoond dat de string s wordt aanvaard door NFA C, m.a.w. $s \in L_C$.

- De ster van NFA_1 bepaalt $L^*_{\text{NFA}_1}$:

  We voeren volgende notatie in:

  $$\text{NFA } S = \text{ster}(\text{NFA}_1)$$

  De Kleene-ster van een taal L is de unie van alle talen L^n die ontstaan wanneer we deze taal n keer concateneren met zichzelf ($n \in \mathbb{N}$). Per definitie geldt dat $\varepsilon \in L^*$, want er geldt dat $L^0 = \{\varepsilon\}$. We moeten bewijzen dat

  $$s \in L_S \Leftrightarrow s \in L^*_{\text{NFA}_1}$$

  Voor elk accepterend pad in L_S, zijn de enige bogen die karakters uit Σ bevatten de bogen uit NFA_1. Bovendien: voor elke toestand q in NFA_1, gaat elk pad van deze toestand q naar de toestand q_f door q_{f1}. Met andere woorden: de enige strings die in L_S zitten zijn ε en $x_1, x_2, x_3, ...$ (met $x_i \in L_{\text{NFA}_1}$). Dit zijn precies die strings uit $L^*_{\text{NFA}_1}$.

- De unie van NFA_1 en NFA_2 bepaalt $L_{\text{NFA}_1} \cup L_{\text{NFA}_2}$:

  We voeren volgende notatie in:

  $$\text{NFA } U = \text{unie}(\text{NFA}_1, \text{NFA}_2)$$

  Volgens de definitie van de unie van talen geldt dat

  $$L_{\text{NFA}_1} \cup L_{\text{NFA}_2} = \{s \mid s \in L_{\text{NFA}_1} \vee s \in L_{\text{NFA}_2}\}$$

  We moeten bewijzen dat

  $$s \in L_U \Leftrightarrow s \in L_{\text{NFA}_1} \cup L_{\text{NFA}_2}$$

⇒ Neem aan dat $s \in L_U$. Als we deze string parsen met de machine C, maken we in het begin de keuze om vanuit q_s de ε-boog te nemen naar ofwel q_{s1}, ofwel q_{s2}. We veronderstellen het eerste geval, namelijk de keuze voor de starttoestand van NFA_1, het andere geval verloopt analoog. Bij het parsen van de s belanden we uiteindelijk in q_f, want dit is een aanvaarde string. Het bereiken van die toestand kan enkel met een ε-boog vanuit q_{f1} of q_{f2}. Aangezien we in het begin gekozen hebben voor q_{s1} (en dus ook voor NFA_1), kan dat enkel vanuit q_{f1} gebeurd zijn. Het bereiken van q_{f1}[1] wil precies zeggen dat $s \in L_{\text{NFA}_1}$ en dus ook $c \in L_{\text{NFA}_1} \cup L_{\text{NFA}_2}$. We kunnen, zoals gezegd, hetzelfde aantonen voor de keuze van NFA_2 in het begin.

⇐ Als de string $s \in L_{\text{NFA}_1} \cup L_{\text{NFA}_2}$, dan geldt dat ofwel $s \in L_{\text{NFA}_1}$, ofwel $s \in L_{\text{NFA}_2}$. Veronderstel het eerste geval. Dan kunnen we bij het parsen van s aan de hand van de machine U de ε-boog naar q_{s1} nemen, waarna we de string s helemaal parsen, tot we in q_{f1} terechtkomen. Van hieruit kunnen we de ε-boog naar q_f nemen. We vinden dus dat s wordt aanvaard door U en dus dat $s \in L_U$. Het andere geval (namelijk dat $s \in L_{\text{NFA}_2}$) loopt nu volledig analoog.

We bewijzen nu de oorspronkelijke stelling aan de hand van structurele inductie:

- Basisstap: We bewijzen dat de stelling geldt voor volgende basisgevallen:
  - Als $E = \varepsilon$, dan is $L_E = \{\varepsilon\}$. Kijkend naar de constructie van de NFA voor dit basisgeval op pagina 21, zien we duidelijk dat deze NFA dezelfde taal bepaalt als E en dus geldt dat $L_{\text{NFA}_E} = L_E = \{\varepsilon\}$.
  - Als $E = \phi$, dan is $L_E = \emptyset$. Kijkend naar de constructie van de NFA voor dit basisgeval op pagina 21, zien we duidelijk dat deze NFA dezelfde taal bepaalt als E en dus geldt dat $L_{\text{NFA}_E} = L_E = \emptyset$.
  - Als $E = a \in \Sigma$, dan is $L_E = \{a\}$. Kijkend naar de constructie van de NFA voor dit basisgeval op pagina 21, zien we duidelijk dat deze NFA dezelfde taal bepaalt als E en dus geldt dat $L_{\text{NFA}_E} = L_E = \{a\}$.
- Inductiestap: neem aan dat de stelling geldt voor reguliere expressies E_1 en E_2:

  $$L_{\text{NFA}_{E_1}} = L_{E_1}, \quad L_{\text{NFA}_{E_2}} = L_{E_2}$$

  Dan bewijzen we dat de stelling ook geldt ($L_{\text{NFA}_E} = L_E$) voor de ster van E_1, alsook voor de unie en concatenatie van beide RE's:
  - Concatenatie: De operatie wordt als volgt beschreven:

    $$\text{NFA}_{E_1E_2} = \text{concat}(\text{NFA}_{E_1}, \text{NFA}_{E_2})$$

    Uit bovenstaande hulpstelling voor de concatenatie volgt dat deze NFA de concatenatie bepaalt van de talen bepaald door NFA_{E_1} en NFA_{E_1}. Verder gebruiken we ook de inductiehypothese:

    $$L_{\text{NFA}_{E_1E_2}} \overset{\text{hulpstelling}}{=} L_{\text{NFA}_{E_1}} L_{\text{NFA}_{E_2}} \overset{\text{IH}}{=} L_{E_1} L_{E_2}$$

    Omdat volgens de definitie van *de taal bepaald door een RE* geldt dat $L_{E_1}L_{E_2} = L_{E_1E_2}$, volgt het te bewijzen nu direct: $L_{\text{NFA}_{E_1E_2}} = L_{E_1E_2}$
  - Ster: Het operatie wordt als volgt beschreven:

    $$\text{NFA}_{E_1^*} = \text{ster}(\text{NFA}_{E_1})$$

    Uit bovenstaande hulpstelling voor de ster volgt dat deze NFA de taal $L^*_{\text{NFA}_{E_1}} \overset{\text{IH}}{=} L^*_{E_1}$ bepaalt. Dat wil precies zeggen dat $L_{\text{NFA}_{E_1^*}} = L^*_{E_1} = L_{E_1^*}$[2], zoals bewezen moest worden.

[1]Hiermee wordt bedoeld dat de toestand bereikt wordt zonder dat er nog symbolen overschieten in s die nog geparst moeten worden.
[2]Gebruik hier ook de definitie van een taal bepaald door een reguliere expressie.

– Unie: De operatie wordt als volgt beschreven:

$$\mathrm{NFA}_{E_1|E_2} = \mathrm{unie}(\mathrm{NFA}_{E_1}, \mathrm{NFA}_{E_2})$$

Uit bovenstaande hulpstelling voor de unie volgt dat deze NFA de taal

$$L_{\mathrm{NFA}_{E_1}} \cup L_{\mathrm{NFA}_{E_2}} \overset{\mathrm{IH}}{=} L_{E_1} \cup L_{E_2}$$

bepaalt. Dat wil precies zeggen dat $L_{\mathrm{NFA}_{E_1|E_2}} = L_{E_1} \cup L_{E_2} = L_{E_1|E_2}$[3], zoals bewezen moest worden.

□

Pagina 26

Stelling. De omzetting van NFA naar GNFA wijzigt de verzameling aanvaarde strings niet.

Bewijs.

- Stel dat NFA dezelfde taal L_E bepaalt als een reguliere expressie E. Een nieuwe begintoestand toevoegen met een ε boog naar de oude staat gelijk aan de expressie εE, dewelke gelijk is aan E.
- Stel dat NFA dezelfde taal L_E bepaalt als een reguliere expressie E. Een nieuwe eindtoestand toevoegen met een ε bogen van de oude toestanden naar de nieuwe, staat gelijk aan de expressie $E\varepsilon$, dewelke gelijk is aan E.
- Het toevoegen van de extra bogen om de GNFA te vervolledigen wijzigt de verzameling aanvaarde talen niet. Deze ϕ-bogen kunnen niet gevolgd worden en dus kunnen er geen toestanden bereikt worden die voordien niet bereikt konden worden.
- Indien we twee parallelle gerichte bogen met labels $a_1 \in \Sigma$ en $a_2 \in \Sigma$ samennemen als een unie van die labels, dan verandert de verzameling aanvaarde strings niet. We kunnen immers de reguliere expressie $E_1|E_2$ met $E_1 = a_1$ en $E_2 = a_2$ omzetten naar een NFA met twee toestanden waarvan tussen er twee parallelle gerichte bogen lopen die de labels a_1 en a_2 hebben.

□

Pagina 28, bewijs DFA

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

Bewijs. Uit de constructie op pagina 27-28 volgt duidelijk dat de geconstrueerde automaat een DFA is:

- Er zijn geen ε-bogen, want $\delta'(q', a)$ is enkel gedefinieerd voor $a \in \Sigma$ (en $q' \in Q'$), m.a.w. $a \neq \varepsilon$
- De functie $\delta' : Q' \times \Sigma \to Q'$ is een totale functie: ze is overal goed gedefinieerd.

Wat betreft de equivalentie, moeten we verifiëren dat

$$\forall w \in \Sigma^* : \quad q'_s \overset{w}{\rightsquigarrow} F' \text{ (in de DFA)} \quad \Longleftrightarrow \quad q_s \overset{w}{\rightsquigarrow} F \text{ (in de NFA)}$$

We bewijzen beide richtingen.

⇒ Deze implicatie volgt uit iets algemeners dat we nu zullen bewijzen: zij S een deelverzameling van Q gesloten onder ε-bogen. Dan geldt

$$\forall w \in \Sigma^* : \quad q'_s \overset{w}{\rightsquigarrow} S \text{ (in de DFA)} \quad \Longrightarrow \quad \forall p \in S : q_s \overset{w}{\rightsquigarrow} p \text{ (in de NFA)}$$

Dit bewijzen we per inductie op de lengte van w.

[3] Idem

- Basisstap: Als $|w| = 0$, dan geldt dat $w = \varepsilon =$ de lege string. Neem aan dat $q'_s \overset{w}{\rightsquigarrow} S$. Dan is $S = q'_s = \{q_s, \text{toestanden bereikbaar vanuit } q_s \text{ met } \varepsilon\}$. We zien nu duidelijk in dat de implicatie geldt en dat elke toestand in S bereikbaar is vanuit q_s met w.
- Inductiehypothese: veronderstel dat de stelling geldt voor alle strings w van hoogstens lengte $|w| = n$.
- Inductiestap: Beschouw een string $w' = wa$ (met $a \in \Sigma$) van lengte $n + 1$.

  We willen aantonen dat als $q'_s \overset{wa}{\rightsquigarrow} S$, dan geldt $\forall p \in S : q_s \overset{wa}{\rightsquigarrow} p$. Zij S_2 de toestand in de DFA zodat $q'_s \overset{w}{\rightsquigarrow} S_2$. Wegens de inductiehypothese geldt nu

  $$\forall p \in S_2 : \quad q_s \overset{w}{\rightsquigarrow} p$$

  We kunnen in in de DFA in S geraken door een pijl met label a te volgen vanuit toestand S_2. Dit betekent precies dat S de verzameling is van alle toestanden die we in de NFA kunnen bereiken door vanuit een toestand in S_2 een pijl te nemen met een label a erop, gevolgd door eventueel een aantal ε-bogen. En dus geldt voor iedere $p \in S$ dat $q_s \overset{w'}{\rightsquigarrow} q$, hetgeen we wilden bewijzen.

Nu volgt de rechterimplicatie

$$q'_s \overset{w}{\rightsquigarrow} F' \quad \Longrightarrow \quad \exists S \in F' : q'_s \overset{w}{\rightsquigarrow} S \overset{\text{hierboven}}{\Rightarrow} \forall p \in S : q_s \overset{w}{\rightsquigarrow} p \quad \overset{S \in F'}{\Longrightarrow} \quad \exists p \in S : p \in F$$

Voor die laatste p geldt dus ook dat $q_s \overset{w}{\rightsquigarrow} p$ en dus $q_s \overset{w}{\rightsquigarrow} F$

$\Leftarrow$ Als $q_s \overset{w}{\rightsquigarrow} F$, dan bestaat er een $q \in F$ zodat $q_s \overset{w}{\rightsquigarrow} q$. Er bestaat in de NFA dus een accepterend pad $q_s, q_1, q_2, ..., q_n, q$. Voor een toestand q in de NFA, zij $S(q)$ de grootste verzameling die q bevat en gesloten is onder ε-bogen. Nu is $S(q_s), S(q_1), S(q_2), ..., S(q_n), S(q)$ een accepterend pad in de DFA. En dus $q'_s \overset{w}{\rightsquigarrow} S(q)$ en dus $q'_s \overset{w}{\rightsquigarrow} F'$.

□

Pagina 34, bewijs DFA_{min}

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

Bewijs. DFA_{min} is een DFA:

- Er zijn geen ε-bogen
- 2 verschillende bogen met hetzelfde symbool vanuit p en q versmelten wanneer de twee toestanden zelf versmelten door f-gelijkheid: stel namelijk dat p en q f-gelijk zijn. Dan zijn ook $p' = \delta(p, a)$ en $q' = \delta(q, a)$ f-gelijk. We bewijzen dat.

  De f-strings van p en q zijn gelijk, 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' en q' dezelfde f-strings en zijn ze f-gelijk.

De equivalentie van DFA en DFA_{min} bewijzen we door per inductie aan te tonen dat

$$w \text{ is een f-string van } Q_i \text{ (in DFA}_{\text{min}}) \quad \Longleftrightarrow \quad w \text{ is een f-string van alle } q \in Q_i \text{ (in DFA}_{\text{origineel}})$$

- Basisstap: als de lengte van de string w gelijk is aan 0, geldt dat $w = \varepsilon$. Nu geldt dat

$$\begin{aligned} \varepsilon \text{ is een f-string van } Q_i &\Leftrightarrow Q_i \in \tilde{F} \\ &\Leftrightarrow Q_i \subseteq F \\ &\Leftrightarrow q \in F \qquad (\forall q \in Q_i) \\ &\Leftrightarrow \varepsilon \text{ is een f-string van alle } q \in Q_i \end{aligned}$$

- Inductiehypothese: stel dat w is een f-string van $Q_i \Leftrightarrow w$ is een f-string van alle $q \in Q_i$ (met $|w| = n$).

- Inductiestap: beschouw de string $w' = aw$. We tonen aan dat de stelling ook geldt voor deze string van lengte $|w'| = n + 1$, m.a.w. we tonen aan dat

$$w' = aw \text{ is een f-string van } Q_i \Leftrightarrow w' = aw \text{ is een f-string van alle } q \in Q_i$$

. Er geldt dat

$$\begin{aligned}
aw \text{ is een f-string van } Q_i &\Leftrightarrow \tilde{\delta}^*(Q_i, aw) \in \tilde{F} \\
&\Leftrightarrow \tilde{\delta}^*\left(\tilde{\delta}(Q_i, a), w\right) \in \tilde{F} && \text{(eigenschap op p.30)} \\
&\Leftrightarrow w \text{ is een f-string van } \tilde{\delta}(Q_i, a) \\
&\Leftrightarrow w \text{ is een f-string van alle } q \in \tilde{\delta}(Q_i, a) && \text{(inductiehypothese)} \\
&\Leftrightarrow aw \text{ is een f-string van alle } q \in Q_i
\end{aligned}$$

$\square$