

UPPSALA UNIVERSITET

FÖRELÄSNINGSANTECKNINGAR

# **Automatateori**

*Rami Abou Zahra*

Inlämningsdatum  
September 20, 2022

## CONTENTS

1. Mål med kursen	2
1.1. Några tillämpningar av teorin	2
2. Alfabet och Strängar	3
2.1. Terminologi	3
2.2. Operationer på strängar	4
3. Språk	6
3.1. Operationer på språk	6
3.2. Kleenestjärnatillslutning	6
4. Reguljära språk och uttryck	8
5. Determiniska finita (ändliga) automater [DFA]	9
5.1. Grafisk beskrivning av en DFA	9
6. Icke-Determiniska Finita (ändliga) automater [NFA]	11
6.1. Omvandling av en NFA till en DFA som accepterar samma språk	13
7. Övning	18
8. Generaliserade Finita Automater [GFA]	19
8.1. Tillståndseliminationsalgoritmen	19
9. Analys av reguljära uttryck	30
9.1. Minimering av DFA	30
10. Slutenhetsegenskaper hos reguljära språk	35
10.1. Konstruktion av en "snitt"-DFA	36
11. Reguljära språkens gränser	37
12. Grammatiker	39
12.1. Produktion av strängar	39
12.2. Sammanhangsfria grammatiker och språk	40
13. Pushdownautomater [PDA]	43
13.1. En liten informell beskrivning:	43
13.2. Grafisk beskrivning av PDA	43
13.3. Kriterier för acceptans hos PDA	44
13.4. Språk hos PDA	44

## 1. MÅL MED KURSEN

Målet med kursen är att studera matematiska modeller för beräkningar/beräkningsbarhet

På detta vis vill vi kunna förstå vilka problem som överhuvudtaget är beräkningsbara samt nå en förståelse om hur svåra olika beräkningsbara problem är att lösa. Vi vill även bli bekanta med matematiska modeller för beräkningar som tillämpas inom datavetenskap och andra ämnen. Vi kommer även kika lite på användbara algoritmer inom programkonstruktion.

### 1.1. Några tillämpningar av teorin.

De bästa metoderna för översättning av hög-nivå språk såsom Python till maskinkod bygger på teorin om *sammanhangsfria grammatiker*

Det visar sig även att data som följer ett visst mönster kan metoder som är beroende på *ändliga automater* och *reguljära uttryck* användas för att exempelvis söka i datan/databaser.

Det går även att tillämpa teorin för att bestämma om ett konkret problem ens är lösbart algoritmiskt (dvs beräkningsbar)

Fler tillämpningsområden:

- Lingvistik
- Bio-informatik

## 2. ALFABET OCH STRÄNGAR

## 2.1. Terminologi.

**Definition/Sats 2.1: Alfabet**

En ändlig (icke-tom) mängd av tecken/symboler. Brukar betecknas stora sigma ( $\Sigma$ )

**Exempel:**

Mängden  $\{0, 1\}$  är ändlig, icke-tom, och består av tecken/symboler. Alltså är det ett korrekt alfabet enligt vår definition

Mängden  $\{\perp, \vdash, \wedge\}$  är ändlig, icke-tom, och består av symboler. Alltså är även detta ett korrekt alfabet

Mängden  $\mathbb{N}$  däremot, är ej ändlig, den är icke-tom och består av tecken/symboler, men ej ändlig. Alltså är de naturliga talen ej ett korrekt alfabet.

**Definition/Sats 2.2: Sträng**

En sträng definieras som en kombination av karaktärerna i alfabetet. En intuitiv fråga som kanske dyker upp är om det finns något supremum (max-längd) på strängarna och svaret är nej. Vi ska kika mer på det snart

Låt  $\Sigma = \{0, 1\}$  vara ett alfabet. Då är 0 en valid sträng, men även 1 och 01 och 00 och 11 och  $\dots$

I definitionsrutan sade vi att strängarna kan bli hur stora som helst, och eftersom vi bara kan lägga till fler symboler från vårt alfabet in i strängen så kan mängden av strängar bli oändligt stor.

Men, hur oändligt stor?

**Definition/Sats 2.3: Uppräknelig mängd**

En mängd  $A$  kallas för en **uppräknelig mängd** om det finns en *surjektiv* funktion  $f : \mathbb{N} \rightarrow A$

Mycket ord att ta in, vi påminner oss om vad surjektion betyder:

**Definition/Sats 2.4: Surjektiv**

En **surjektiv** funktion är en funktion vars målmängd träffas helt.

Alltså, givet en avbildning (funktion)  $f : A \rightarrow B$  kommer funktionen att evalueras till alla tal i mängden  $B$ . Detta betyder inte nödvändigtvis att hela  $A$  används

Ett exempel på en surjektiv funktion är en funktion  $f(x)$  så att givet 2 olika  $x$ -värden ges samma  $y$ -värde.  $f(x) = x^2$  är en sådan funktion

**Anmärkning:**

Om en mängd  $A$  är uppräknelig så kan  $A$  skrivas som  $A = \{a_n : n \in \mathbb{N}\}$

**Anmärkning:**

Om en mängd  $A$  är ändlig så är  $A$  uppräknelig. Exempelvis är vår mängd  $\Sigma$  alltid ändlig och därmed alltid uppräknelig.

**Kuriosa/Anmärkning:**

Varje program kan betraktas som en ändlig sträng över alfabetet  $\{0, 1\}$ , alltså är mängden av program uppräknelig!

**Påstående:**

Mängden av funktioner  $g : \mathbb{N} \rightarrow \{0, 1\}$  är *inte* uppräknelig

**Proof 2.1: Bevis av påstående**

Antag för motsägelse att mängden av funktioner  $g : \mathbb{N} \rightarrow \{0, 1\}$  är uppräknelig.

Då kan vi göra en lista  $g_0, g_1, g_2, \dots$  av alla sådana funktioner.

Definiera nu en funktion  $h$  enligt följande:

$$h(n) = \begin{cases} 0 & \text{om } g_n(n) = 1 \\ 1 & \text{om } g_n(n) = 0 \end{cases}$$

Då gäller att  $h : \mathbb{N} \rightarrow \{0, 1\}$ , alltså finns  $h$  med i mängden av funktionerna.

Men! Enligt definition av  $h$  så finns det inte en funktion  $g_n$  så att  $g_n = h$  (vi tar ju motsatt värde till  $g_n$ ) för varje  $n \in \mathbb{N}$ , men detta betyder att  $h$  *inte* finns med i lista, vilket är en motsägelse  $\square$

**Definition/Sats 2.5**

Det finns någon funktion  $g : \mathbb{N} \rightarrow \{0, 1\}$  som *inte* kan beräknas av något program

**Proof 2.2**

Låt  $A$  vara mängden av funktioner  $g : \mathbb{N} \rightarrow \{0, 1\}$  och låt  $P$  vara mängden av program.

Antag att för varje  $g \in A$  så finns  $p_g \in P$  som beräknar  $g$ .

Låt  $g' \in A$  vara godtycklig funktion ur mängden  $A$ .

Eftersom  $P$  är uppräknelig så finns en surjektiv avbildning  $f : \mathbb{N} \rightarrow P$ .

Men då kan vi definiera en surjektiv funktion  $h : \mathbb{N} \rightarrow A$  genom att låta  $h(n)$  vara  $g$  om  $f(n) = p_g$  för något  $g \in A$  och  $g'$  annars

Detta motsäger att  $A$  inte var uppräknelig.  $\square$

**2.2. Operationer på strängar.**

Låt  $v = a_1 \dots a_n$  och  $w = b_1 \dots b_n$  vara strängar. Vi vill, likt hur man definierar plus och gånger med tal, definiera operationer för strängar:

**Definition/Sats 2.6: Sammanfogning**

Sammanfogning (sträng1 + sträng2) definieras enligt följande:  $vw = a_1 \dots a_n b_1 \dots b_n$

Notera! Ordning spelar roll ( $a_1 b_1 \neq b_1 a_1$ )

**Definition/Sats 2.7: Repetition  $n$ -gånge**

Detta fungerar ungefär som att ta (sträng) <sup>$n$</sup> :

$$v^n = \underbrace{vvv \dots v}_{n \text{ gånger}}$$

**Definition/Sats 2.8: Reversering**

Här vill vi härma "ta ordet baklänges" fast med strängar, alltså:

$$v^{rev} = a_n \dots a_1 \text{ istället för } v = a_1 \dots a_n$$

Givetvis finns det strängar där  $v = v^{rev}$ , låt  $v = \text{racecar}$  och se vad som händer om vi reverserar den!

En ganska central grej med både addition och multiplikation inom matematik är "enheten", det vill säga  $1-1 = 0$  (där 0 är enheten för addition) och  $2 \cdot \frac{1}{2} = 1$  (där 1 är enheten för multiplikation).

Vi vill försöka härma enheten, det vill säga, finna en sträng sådant att den inte påverkas av operationerna vi tidigare har definierat.

En egenskap hos dessa enheter som vi vill bevara är deras "längd", tänk exempelvis enhetsvektorn som har längd 1 för att åstadkomma att vi ej förflyttar oss. Med addition och multiplikation får vi tänka oss tallinjen, 0 i addition betyder att vi inte rör oss i tallinjen på samma sätt som 1an gör med multiplikation.

### Definition/Sats 2.9: Längd av sträng

Längden av en sträng  $v = a_1 \cdots a_n$  betecknas  $|v| = n$  och betyder "hur många tecken från alfabetet  $\Sigma$  har jag använt?"

### Definition/Sats 2.10: Tomma strängen

Vi definierar den **tomma strängen** ( $\varepsilon$ )

Under operationer beter sig  $\varepsilon$  på följande sätt:

$$\varepsilon^{\text{rev}} = \varepsilon$$

$$\varepsilon\varepsilon = \varepsilon$$

$$v\varepsilon = v = \varepsilon v$$

Varför kallas den för tomma strängen om det är en enhet? Jo! Vi testar att evaluera längden av  $\varepsilon$ :

$$|\varepsilon| = 0$$

Det som kan vara ointuitivt är att den tomma strängen *inte* finns i något alfabet omm (om och endast om) det inte specificeras i definitionen, men  $\varepsilon$  den är en valid sträng i alla alfabet.

Den beter sig lite som tomma mängden, i den att följande gäller för en godtycklig mängd  $A$ :

$$\emptyset \notin A \quad \varepsilon \notin \Sigma$$

$$\emptyset \subseteq A \quad \varepsilon \subseteq \Sigma$$

Låt  $x, y$  vara strängar, då gäller följande:

### Definition/Sats 2.11: Prefix

Vi säger att  $x$  är en **prefix** till  $y$  om det finns en sträng  $z$  så att  $xz = y$

#### Exempel:

Låt  $y = \text{sportbil}$ ,  $x = \text{sport}$ , då är  $z = \text{bil}$  och "sport" ( $x$ ) är prefixet.

### Definition/Sats 2.12: Suffix

Vi kallar  $x$  för **suffix** till  $y$  om det finns en sträng  $z$  så att  $zx = y$

#### Exempel:

I föregående exempel med strängen "sportbil", så är "bil" suffixet till "sportbil".

### 3. SPRÅK

Vi har definierat vårt alfabet (exvis siffror), bildat strängar m.h.a operationer (operationer med tal). Kombinerar vi dessa bör vi rimligtvis få ut något som påminner om vektorrum, det vill säga en mängd med tal med några operationer (i vårt fall är mängden tal = mängden strängar, och operationerna de operationer vi definierat överst).

#### Definition/Sats 3.1: Språk

Ett **språk** över ett alfabet  $\Sigma$  är en mängd strängar över  $\Sigma$

Några speciella språk:

- $\emptyset$  (tomma mängden)
- $\{\varepsilon\}$
- $\Sigma$
- $\Sigma^*$  (mängden av alla strängar över  $\Sigma$ )

Med liknande resonemang som tidigare kan man visa att:

- $\Sigma^*$  är uppräknelig
- Mängden av alla språk över  $\Sigma$  är inte uppräknelig

#### 3.1. Operationer på språk.

Låt  $\Sigma$  vara ett alfabet och låt  $L, L_1, L_2$  vara språk över  $\Sigma$ .

Nya språk (över  $\Sigma$ ) kan bildas genom:

- Union  $L_1 \cup L_2$
- Snitt  $L_1 \cap L_2$
- Differens  $L_1 - L_2$
- Komplement i  $\Sigma^*$  är  $\Sigma^* - L$
- Sammanfogning  $L_1 L_2 = \{wv : w \in L_1 \wedge v \in L_2\}$
- Repetition:
  - $L^0 = \{\varepsilon\}$
  - $L^{n+1} = L^n L$

#### 3.2. Kleenestjärnatillslutning.

Vi har använt notationen ”upphöjt till en stjärna” för att på sätt och vis indikera mängden av alla kombinationer av element. Exempelvis har vi använt  $\Sigma^*$  för att beteckna alla möjliga konstruerbara strängar i ett alfabet.

Av dessa strängar kunde vi skapa språk, detta betecknades med  $L$ , och med dessa språk hade vi operationer, precis som vi hade operationer med våra strängar där vi kunde konstruera nya språk givet andra språk, då är frågan om vi kan konstruera mängden av alla språk!

*Kleenestjärnatillslutning* går ut på följande princip:

$$\sum_{i=0}^{\infty} x^i = x^0 + x^1 + x^2 + x^3 \dots$$

Där vi på något sätt vill sammanfoga alla språk  $L^i$ . Detta gör vi på följande sätt:

$$L^* = \{w : w \in L^n \text{ för något } n \in \mathbb{N}\} = \bigcup_{i=0}^{\infty} L^i = L^0 \cup L^1 \cup L^2 \cup L^3 \dots$$

$L^*$  uttalas ” $L$ -stjärna”. Notera att vi har med mängden  $\varepsilon$  eftersom vi har  $L^0$ , vi kan välja att omittera denna genom att använda  $L$ -plus istället ( $L^+$ ).

**Exempel:**

Låt  $\Sigma = \{a, b\}$ ,  $L_1 = \{aa\}$  och  $L_2 = \{aa, bb\}$ . Då gäller följande:

$$(L_1)^* = \{(aa)^n : n \in \mathbb{N}\} = \{\varepsilon, aa, aaaa, aaaaaa, \dots\}$$

$$(L_1)^+ = \{aa, aaaa, aaaaaa, \dots\}$$

$$(L_2)^* = \{\varepsilon, aa, bb, aaaa, aabb, bbaa, bbbb, \dots\}$$



## 4. REGULJÄRA SPRÅK OCH UTTRYCK

Låt  $\Sigma$  vara ett alfabet. Vi definierar följande:

**Definition/Sats 4.1: Reguljära uttryck**

- $\emptyset$  är ett reguljärt uttryck för språket  $\emptyset$
- $\varepsilon$  är ett reguljärt uttryck för språket  $\{\varepsilon\}$
- För varje  $\sigma \in \Sigma$  så är  $\sigma$  ett reguljärt uttryck för språket  $\{\sigma\}$
- Om  $\alpha$  och  $\beta$  är reguljära uttryck för språken  $L_1$  och  $L_2$  så är följande även reguljära uttryck för språken  $L_1 \cup L_2$ ,  $L_1 L_2$ ,  $L_1^*$  och  $L_1^+$ :
  - $(\alpha \cup \beta)$
  - $(\alpha\beta)$
  - $(\alpha^*)$
  - $(\alpha^+)$

**Definition/Sats 4.2: Reguljära språk**

Om  $L$  är ett språk och det finns ett reguljärt uttryck för  $L$  så säger vi att  $L$  är reguljärt

**Exempel:**

Låt  $\Sigma = \{0, 1\}$

Då är  $(0 \cup (1(0^*)))$  ett reguljärt uttryck för språket  $L = \{0\} \cup (\{1\}(\{0\}^*)) = \{0\} \cup \{10^n : n \in \mathbb{N}\}$

Eftersom det finns ett reguljärt uttryck för  $L$ , så är även språket  $L$  reguljärt i detta fall.

**Anmärkning:**

För notationens enkelhet så reducerar vi paranteser enligt följande paranteskonvention:

- Först  $*$  eller  $+$
- Sedan Sammanfogning
- Sist union

Jämför med paranteskonvention för aritmetiska uttryck som ser ut på följande vis:

- Först exponent
- Sedan multiplikation
- Sedan addition

**Exempel:**

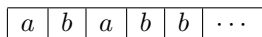
Vi skriver  $0 \cup 10^*$  istället för  $(0 \cup (1(0^*)))$

(Notera! Det är inte siffran tio, utan siffran ett sammanfogat med noll).

## 5. DETERMINISKA FINITA (ÄNDLIGA) AUTOMATER [DFA]

Förr i tiden programmerades datorer genom att man hade "punch-cards", det vill säga kort av styvt papper som hade "hål" som agerade som dagens transistorer gör.

DFA:er påminner lite om hur dessa fungerar, det vill säga att vi ska tänka oss en slags textremsa som inmatning:



Där ändligt många inledande rutor innehåller tecken från en sådan textremsa med alfabet  $\Sigma$ .

Vi har också en "kontrollmekanism", det vill säga själva DFA:n som vi kan tänka oss har ett "läshuvud" som avläser en ruta i taget (det är viktigt att precisera, DFA:er läser EN ruta i taget).

DFA:n befinner sig alltid i ett tillstånd, av ändliga antal möjliga. När den avläser en ruta så övergår den till ett nytt tillstånd samt flyttar läshuvudet ett steg till höger.

Det nya tillståndet beror (endast) på det tidigare tillståndet samt det just avlästna tecknet (i föregående ruta).

De två "viktigaste" tillstånd kallas för **starttillståndet** och **accepterande tillståndet**.

Vi antar att en DFA alltid befinner sig i starttillståndet då den sätts igång.

Om en DFA befinner sig i ett accepterande tillstånd då en sträng har avlästs (det vill säga, läshuvudet befinner sig på den första blanka rutan till höger om strängen) så säger vi att DFA:n **accepterar** strängen.

Om strängen inte accepteras, så avvisas strängen.

### 5.1. Grafisk beskrivning av en DFA.

Vi väljer att representera tillstånden med hjälp av noder, och tillståndsövergångar med pilar:

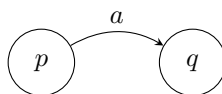


FIGURE 1.

Figur 1 betyder att om DFA:n befinner sig i tillstånd  $p$  och avläser  $a$  på textremsan så övergår DFA:n till tillstånd  $q$  (och flyttar därmed läshuvudet ett steg till höger).

#### Anmärkning:

För varje tillstånd och varje tecken från input-alfabetet skall det finnas *precis* en utgående pil som bär detta tecken.

Starttillstånd markeras med en pil mot sig:



FIGURE 2.

Accepterande tillstånd markeras med en pil från sig *eller* dubbelrand:



FIGURE 3.

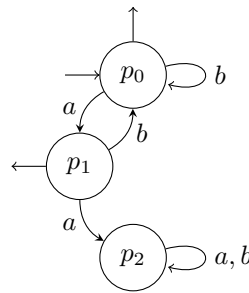
**Exempel:**

FIGURE 4.

Kom ihåg att en sträng accepteras om vi befinner oss i ett accepterande tillstånd då hela strängen är avläst.

Vilka strängar accepteras av ovanstående DFA?  $((b \cup ab)^*(\varepsilon \cup a))$

**Definition/Sats 5.1**

Antag att  $M$  är en DFA.

Mängden av strängar som  $M$  accepterar kallas för  $M$ 's **språk** och betecknas  $L(M)$

**Definition/Sats 5.2: Formell definition av DFA**

En **DFA** är en 5-tupel  $M = (Q, \Sigma, \delta, s, F)$  där:

- $Q$  är en ändlig mängd (tillståndsmängden)
- $\Sigma$  är en ändlig mängd (inputalfabet)
- $\delta$  är en funktion (övergångsfunktion) från  $Q \times \Sigma \rightarrow Q$
- $s \in Q$  ( $s$  är Starttillstånd)
- $F \subseteq Q$  (accepterande tillstånden)

För att formellt kunna definiera *acceptans* av en sträng behöver vi en **utvidgad övergångsfunktion**. Denna kan vi löst definiera på följande vis:

**Definition/Sats 5.3: Utvidgad övergångsfunktion**

En funktion  $T(\text{nuvarande tillstånd}, \text{nuvarande symbol på läshuvu}) \rightarrow \text{nästa tillstånd}$

## 6. ICKE-DETERMINISKA FINITA (ÅNDLIGA) AUTOMATER [NFA]

En NFA är en generalisering av en DFA på följande sätt:

- En NFA kan ha flera Starttillstånd
- En NFA tillåts kunna läsa flera tecken på en gång, dvs vi kan tillståndsövergångar på formen:

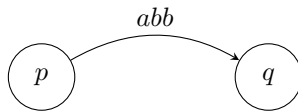


FIGURE 5.

- En NFA kan göra en tillståndsövergång utan att läsa något (läser tecknet  $\varepsilon$ )
- En NFA kan ha flera valmöjligheter i en given situation (icke-determinism), dvs vi kan ha följande situation:

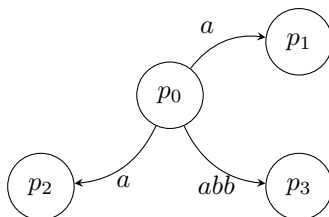


FIGURE 6.

- Det följer att en NFA (i allmänhet) kan "hänga sig"

**Exempel: (På en NFA)**

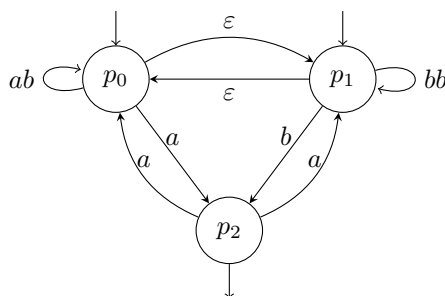


FIGURE 7.

**Definition/Sats 6.1: NFA Acceptans**

En NFA accepterar en sträng  $w$  om vi kan börja i något starttillstånd och gå från tillstånd till tillstånd genom att avläsa en del av strängen  $w$  och slutligen hamna i ett accepterande tillstånd. Det vill säga, om  $w$  kan delas upp i delsträngar  $w = v_1v_2 \cdots v_n$  där vi tillåter  $v_k = \varepsilon$  och det finns tillstånd  $p_0, p_1, \dots, p_n$  där  $p_0$  är ett starttillstånd och  $p_n$  är ett accepterande tillstånd samt följande övergångar:

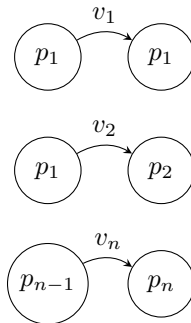


FIGURE 8.

**Exempel:**

Betrakta föregående exempel och strängarna:

*aaa*

*aaaa*

*aabbaa*

*abbba*

Vilka strängar accepteras av NFA:n?

**Definition/Sats 6.2**

Mängden av strängar som accepteras av en NFA  $M$  kallas för  $M$ :s språk, och betecknas precis som i DFA fallet med  $L(M)$

### 6.1. Omvandling av en NFA till en DFA som accepterar samma språk.

Betrakta följande NFA:

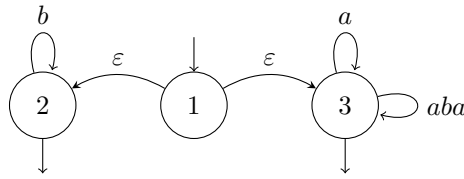


FIGURE 9.

Vi konstruerar först en "icke-glupsk" NFA  $M'$  som avlöser högst ett tecken i taget (försöker gå från generaliseringen tillbaka till en DFA) och accepterar samma strängar som  $M$ .

$M' =$

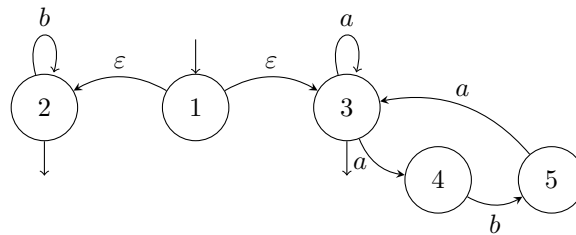


FIGURE 10.

Sedan använder vi den så kallade "delmängdsalgoritmen" för att konstruera en DFA  $M''$  som accepterar samma strängar som  $M'$ .

$M''$ 's starttillstånd är mängden av alla tillstånd i  $M'$  som kan nå utan att avläsa några tecken alls.

I vårt fall når vi naturligtvis noden 1 när vi startar, men genom att använda den tomma strängen kan vi nå nod 2 och 3, alltså blir denna mängd  $\{1, 2, 3\}$ .

Notera att de element från vårt alfabet som vi använder är  $a$  och  $b$ , därför kommer vi nu följa var vi hamnar med just dessa två bokstäver.

Vi ställer oss frågan, vilka noder som nås från  $\{1, 2, 3\}$  genom att *bara* avläsa  $a$ . Börjar vi i nod 1 kan vi ta  $\epsilon$  till 3, loopa runt till 3 igen, och sedan nå nod 4 genom att avläsa  $a$ . Vi kan inte nå nod 5 och avläsa  $a$  för att gå tillbaka till nod 3, ty det kräver att vi avläser  $b$ . Mängden här blir alltså  $\{3, 4\}$ .

Vårt diagram ser just nu ut på följande:

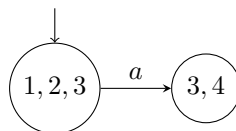


FIGURE 11.

Vi undersöker nu vilka tillstånd vi kan nå genom att avläsa  $b$ . Vi kan avläsa  $\varepsilon$  och komma till nod 2, varpå vi kan avläsa  $b$  för att återigen komma till nod 2. Mängden blir därför  $\{2\}$  och vårt diagram ser ut på följande sätt:

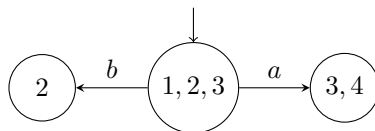


FIGURE 12.

Vi utför denna frågeställning rekursivt tills dess att mängden vi når är  $\emptyset$ , det vill säga nu när vi är på nod 2 så frågar vi oss "vilka noder når vi härifrån om vi bara använder  $a$ " och samma sak för  $b$ .

Vi får då följande diagram:

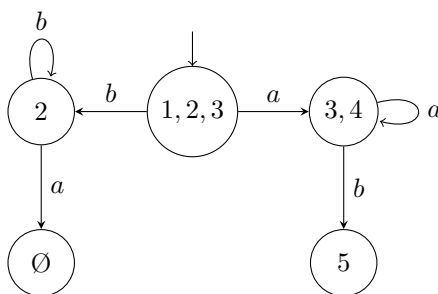


FIGURE 13.

Givetvis fortsätter vi med  $\emptyset$  och 5:

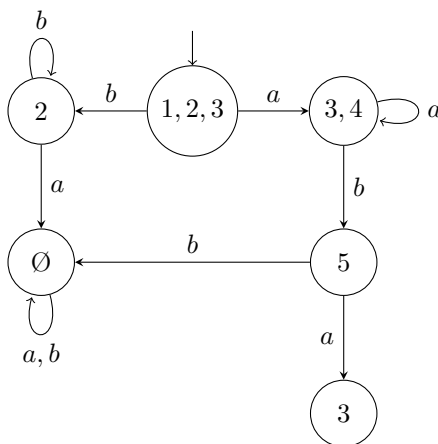


FIGURE 14.

Forstätter vi med 3 får vi slutligen:

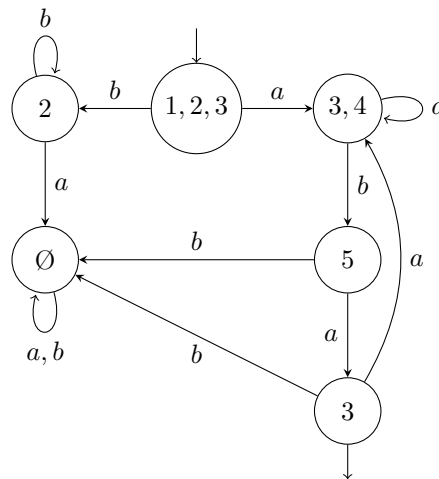


FIGURE 15.

Eftersom inga nya tillstånd (noder) har tillkommit, så är vi klara. Vi kan fråga oss varför denna algoritm alltid terminerar, och då får vi inte glömma att tillståndsmängden bara har ändligt många delmängder.

Notera att de tillstånd i  $M''$  som innehåller något accepterande tillstånd från  $M'$  blir de accepterande tillstånden för  $M''$  (det vill säga, i  $M'$  (Figure 10) hade nod 3 accepterande tillstånd, så de accepterande tillstånden i  $M''$  blir de noder med enbart mängden 3).

Varför accepterar  $M''$  då samma strängar som  $M'$ ?

Jo, enligt konstruktion för en sträng  $w$  så gäller att:

- Det finns en avläsningsväg av  $w$  igenom  $M'$  så att man till slut hamnar i ett accepterande tillstånd  $\Leftrightarrow$  Det finns en (unik) avläsningsväg av  $w$  igenom  $M''$  så att man till slut hamnar i ett accepterande tillstånd.

### Exempel:

Beskriv en avläsningsväg för  $w = aaabaa$  igenom  $M'$  och igenom  $M''$  som slutar med acceptans i båda fallen.

Enligt den beskrivna omvandlingsmetoden så har vi:

#### Definition/Sats 6.3

För varje NFA  $M_1$  så finns en DFA  $M_2$  som accepterar samma språk som  $M_1$

#### Definition/Sats 6.4

För varje NFA  $M$  så finns ett reguljärt uttryck som beskriver  $L(M)$

Vi visar nu:

#### Definition/Sats 6.5

Om  $L$  är ett reguljärt språk så finns en NFA (och alltså även en DFA) som accepterar  $L$



**Proof 6.1**

Induktion över uppbyggnaden av reguljära språk:

- Om  $L = \emptyset$  så accepteras  $L$  av startnoden men ingen accepterande nod, och vice versa (se Figur 16)
- Om  $L = \{\sigma\}$  (godtycklig tecken) så accepteras  $L$  av NFA:n med 2 noder, en start och en accepterande, där det krävs just  $\sigma$  för att ta sig igenom (se Figure 17)
- Antag att  $L = L_1 \cup L_2$  där  $L_1, L_2$  accepteras av  $M_1, M_2$  respektive. Då accepteras  $L$  av (Figure 18)
- Antag att  $L = L_1 L_2$  och att  $L_1, L_2$  accepteras av  $M_1, M_2$  respektive. Då accepteras  $L$  av (Figure 19)
- Antag att  $L = L_1^*$  och att  $L_1$  accepteras av  $M_1$ . Då accepteras  $L$  av (Figure 20)
- Fallet  $L = L^+$  behandlas på liknande sätt som föregående punkt
- Fallet  $L = \varepsilon$  behandlas enligt Figure 21

□

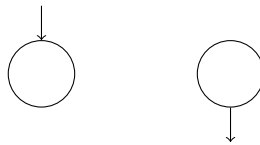


FIGURE 16.

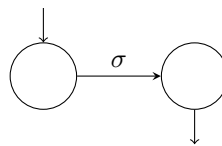


FIGURE 17.

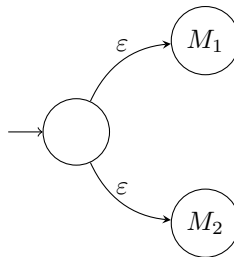


FIGURE 18. "Parallellkoppling"

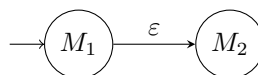


FIGURE 19. "Seriekoppling"

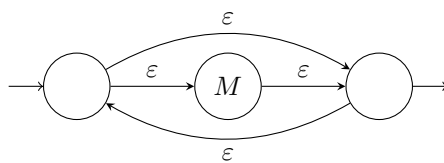


FIGURE 20.

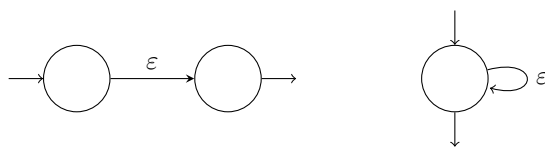


FIGURE 21.

**Definition/Sats 6.6: Finit/ändlig automat**

Med en **finit/ändlig automat** menar vi en NFA eller en DFA (vilken som)

## 7. ÖVNING

En NFA för språket som beskrivs av  $a(aba \cup aa)^*$ :

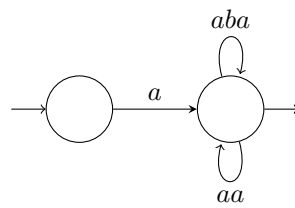


FIGURE 22.

Skapa en DFA för samma språk, gör först NFA:n icke-glupsk (och namnge tillstånden):

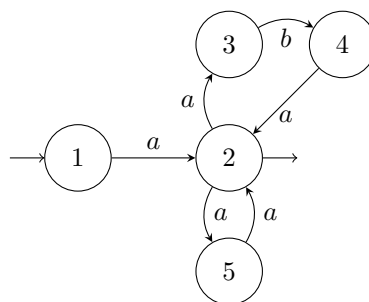


FIGURE 23.

Med delmängdsalgoritmen får vi följande DFA:

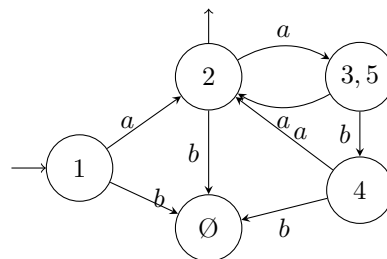


FIGURE 24.

## 8. GENERALISERADE FINITA AUTOMATER [GFA]

En GFA ser ut (grafiskt) som en NFA *förutom* att vi tillåter att pilarna bär reguljära uttryck (istället för endast strängar)

**Exempel:**

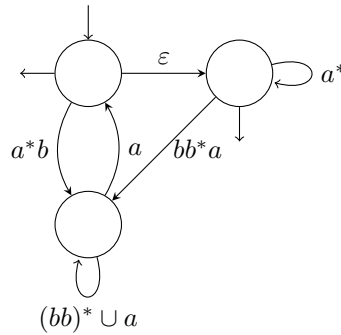


FIGURE 25.

Om  $\alpha$  är ett reguljärt uttryck så tolkar vi:

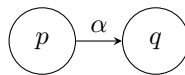


FIGURE 26.

som att man kan gå från tillstånd  $p$  till tillstånd  $q$  genom att avläsa en sträng i språket som  $\alpha$  beskriver.

Vi använder GFA:er för att omvandla en given NFA/DFA  $M$  till ett reguljärt uttryck som beskriver  $L(M)$ , och då följer att  $L(M)$  är reguljärt.

### 8.1. Tillståndseliminationsalgoritmen.

Detta långa namn är namnet på den algoritm som omvandlar en NFA/DFA  $M$  till ett reguljärt uttryck för  $L(M)$ :

Antag att en NFA/DFA  $M$  är given, om  $M$  saknar starttillstånd eller accepterande tillstånd så  $L(M) = \emptyset$  och då beskrivs  $L(M)$  av det reguljära uttrycket  $\emptyset$  (och vi är klara)

(Fråga om det gäller att om en NFA/DFA inte har start/acc. tillstånd att den är isomorf med en annan NFA/DFA som inte heller har start/acc. tillstånd)

Därför kan vi anta att  $M$  har minst ett starttillstånd och minst ett accepterande tillstånd.

Algoritmen går därmed ut på följande sätt:

- Lägg till ett *nytt* starttillstånd och pilar som bär  $\varepsilon$  från detta nya starttillstånd till alla de gamla starttillstånd som nu förlorar sin status som starttillstånd (här förändras *inte* vilka strängar som accepteras)
- Lägg till ett *nytt* accepterande tillstånd och pilar som bär  $\varepsilon$  till detta nya accepterande tillståndet **från** alla de gamla accepterande tillstånden som nu förlorar status som accepterande tillstånd
- Eliminera alla de gamla tillstånden, ett för ett, samt ersätt gamla pilar med nya enligt följande mönster (där krysset markerar det tillstånd som elimineras):

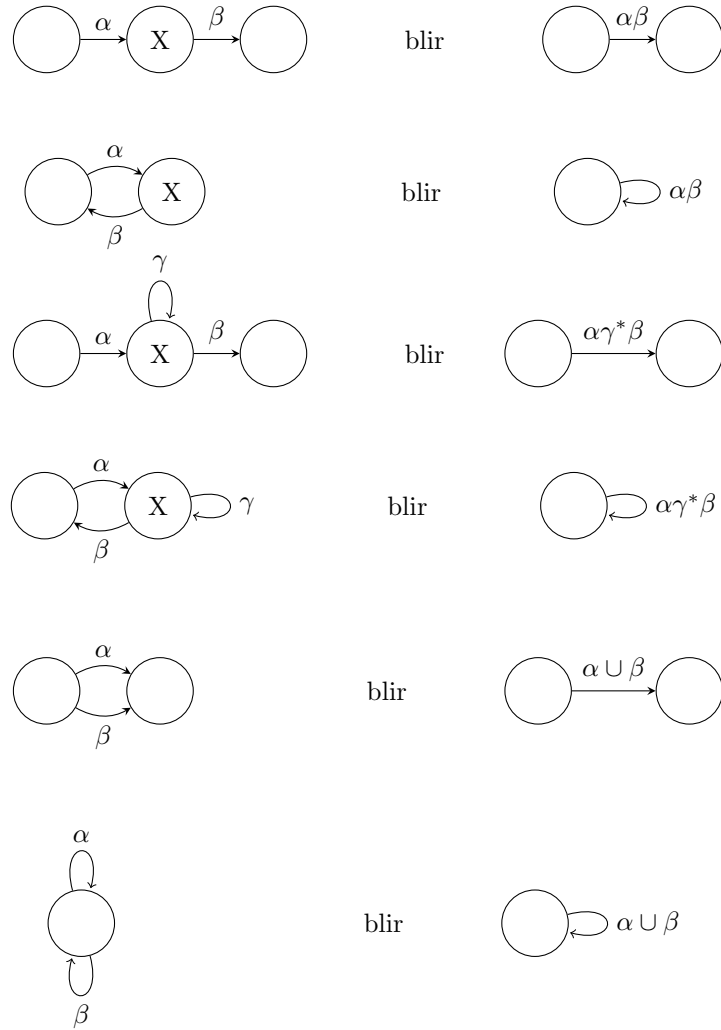


FIGURE 27.

När alla elimineringar har upprepats tills det inte går att förenkla mer, så har vi en GFA på formen:

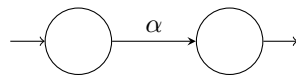


FIGURE 28.

Där  $\alpha$  är ett reguljärt uttryck som beskriver  $L(M)$

Från algoritmen följer det:

**Definition/Sats 8.1**

Varje språk som accepteras av någon finit automata är reguljärt.

**Exempel:**

Betrakta följande NFA samt omvandla till ett reguljärt uttryck:

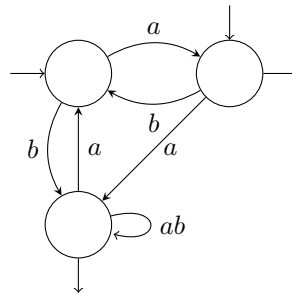


FIGURE 29.

Vi börjar med att lägga till ett nytt starttillstånd samt ett nytt accepterande tillstånd och kopplar de till de redan existerande med  $\varepsilon$ :

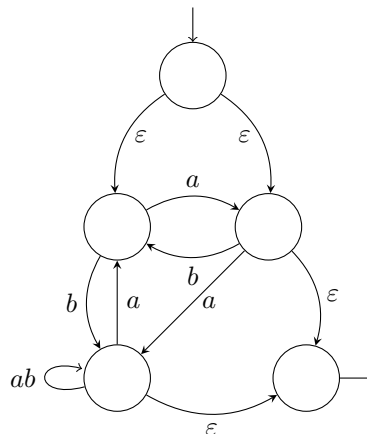


FIGURE 30.

Det finns lite olika strategier för att välja vilken nod man kan börja med att elimineras, personligen föredrar jag att välja den nod med minst antal anslutningar, det gör saker lite lättare.

Om det är så att det endast finns en nod som *inte* har en direkt koppling till det accepterande tillståndet, föredras det eftersom det blir lättare att se vilka kopplingar som måste ersättas. Väljer man en nod som är direkt kopplad till det accepterande tillståndet så finns det flera andra pilar som kommer från andra noder som man kan råka blanda ihop.

Det är många små steg som görs åt gången under elimineringsprocessen, vi ska försöka köra detta exempel med detalj.

Vi börjar med att markera alla noder, detta kommer göra saker lättare att förklara och är inget måste.

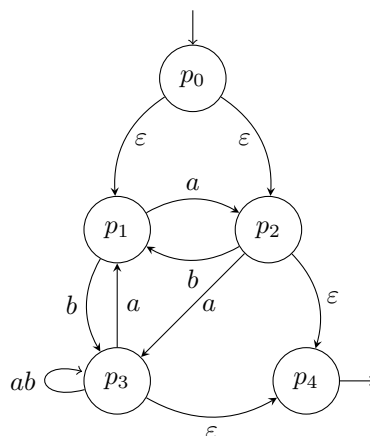


FIGURE 31.

Notera att "den längsta vägen" till det accepterande tillståndet är via  $p_0, p_1, p_3, p_4$

Därför väljer vi att eliminera den noden i den vägen som inte är direkt kopplad till det accepterande tillståndet, det vill säga  $p_1$ :

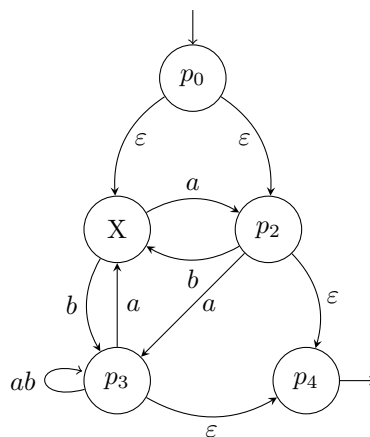


FIGURE 32.

Om vi nu ska ta bort denna nod, så måste vi fortfarande kunna avläsa samma strängar för att komma till ett accepterande tillstånd.

Strategin här är att notera vilka vägar som är möjliga att ta till de noder som är kopplade till  $p_1$ .

Tidigare kunde jag använda  $\epsilon a$  för att gå från  $p_0, p_1, p_2$ . Eftersom  $\epsilon$  är den tomma strängen, så räcker det alltså med att säga "tidigare kunde jag läsa  $a$  för att komma till  $p_2$ ".

Tar vi bort  $p_1$  måste vi kunna gå från  $p_0$  till  $p_2$  genom att också läsa  $a$ . Vi kan lägga till den egenskapen genom följande:

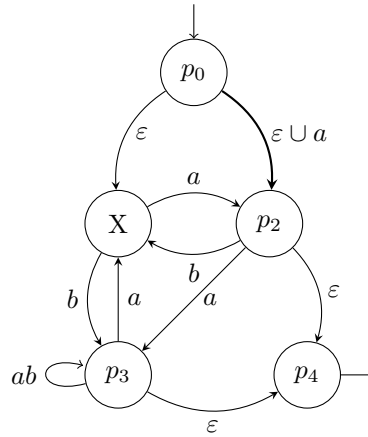


FIGURE 33.

En relevant fråga man kanske ställer sig är ”varför tar vi inte bort vägen  $a$ ” från  $p_2$  till  $p_1$ ? Detta eftersom vi tidigare kunde avläsa  $\varepsilon ba$  för att ”loopa” runt  $p_2$ , och detta måste vi naturligtvis behålla:

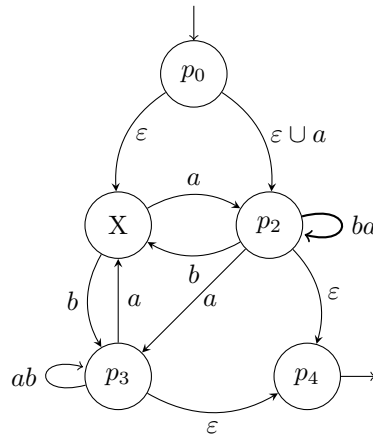


FIGURE 34.

Är vi redo att ta bort de vägarna nu? Nästan. Tidigare kunde vi komma till  $p_3$  via vägen  $p_0, p_2, p_1, p_3$  med strängen  $\varepsilon bb$  eller  $\varepsilon a$ . Vi måste alltså kunna gå från  $p_2$  till  $p_3$  med den strängen, vi gör därför följande:

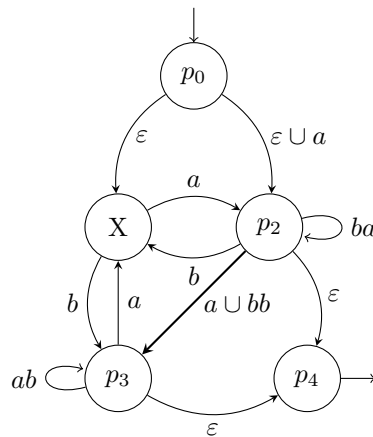


FIGURE 35.



Nu kan vi plocka bort  $b$ -pilen, eftersom vi har återskapat alla vägar:

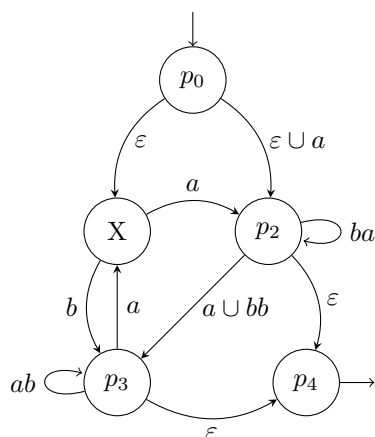


FIGURE 36.

Nu kan vi alldeles strax få bort  $a$ . Notera att vi kunde från  $p_3$  nå  $p_2$  genom  $p_1$  genom att avläsa  $aa$  (gå upp ett steg, sedan till höger), eftersom vi tar bort  $p_1$  behöver vi alltså ha en pil från  $p_3$  till  $p_2$  med  $aa$ . För er som undrar varför vi inte ska ta hänsyn till det  $a$  som redan står på en pil mellan  $p_1$  och  $p_2$  så har vi redan gjort det när vi bytte till  $\epsilon \cup a$

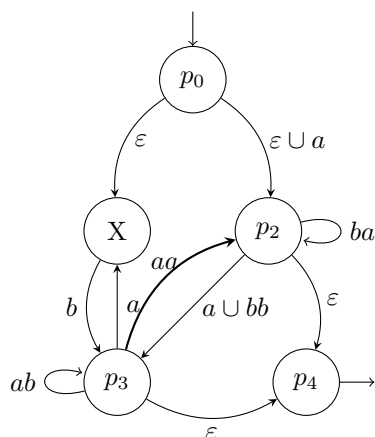


FIGURE 37.

Nästan där! Vi har kunnat läsa  $\epsilon b$  för att ta oss från  $p_0$  till  $p_3$  genom  $p_1$ , vilket är samma sak som att läsa  $b$ . Vi behöver alltså en koppling från  $p_0$  till  $p_3$  med bara  $b$ :

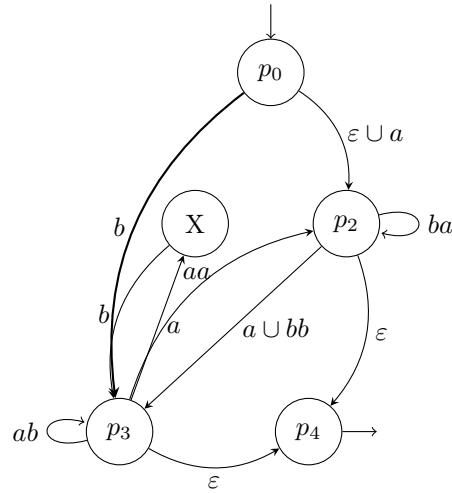


FIGURE 38.

Tidigare har vi kunnat avläsa  $\varepsilon babababab$  för att loopa mellan  $p_1$  och  $p_3$  (trots att  $p_3$  redan har en loop för  $ab$ ), vi har redan replikerat att vi kan ta  $b$  för att komma till  $p_3$ , och eftersom loopen  $ab$  redan finns, behöver vi inte replikera den.

Vi kan därför nu plocka bort pilarna  $a, b$ :

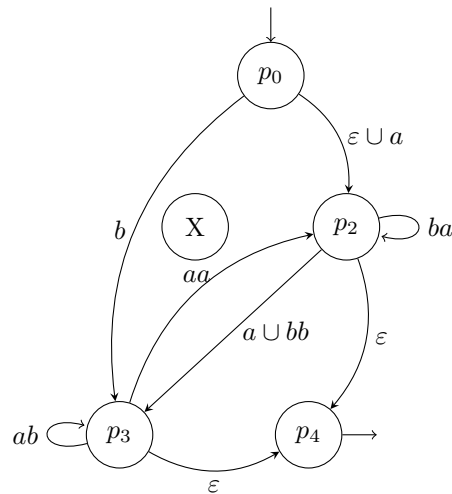


FIGURE 39.

Notera att noden vi vill ta bort är fri! Den har inga kopplingar till andra noder, och vi kan därför ta bort den:

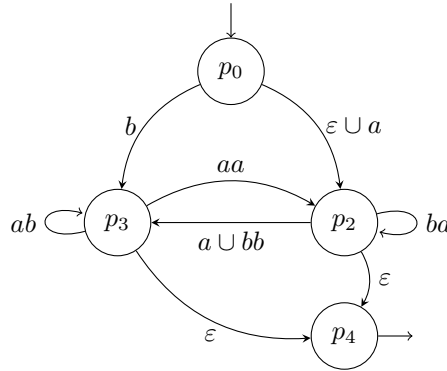


FIGURE 40.

Vi repeterar nu processen för antingen  $p_3$  eller  $p_2$  (det spelar ingen roll, de har precis samma antal kopplingar och kopplas med samma avstånd till det accepterande tillståndet). Vi väljer  $p_3$ .

Det som gör denna nod lite speciell är att den har en loop, och detta måste vi ta hänsyn till varje gång vi kopplar bort en koppling. Fördelen är att vi kan notera detta med  $(ab)^*$  och därmed inkludera de fall då vi inte alls väljer att snurra i loopen (eftersom  $\varepsilon \subseteq (ab)^*$ )

Vi noterar att vi från  $p_2$  kan avläsa  $((a \cup bb)aa)^*$  för att loopa  $p_2$ . Men! Eftersom vi når  $p_3$  (och därmed kan avläsa  $ab$  och loopa  $p_3$ ) så måste vi ha med det i vår nya loop:

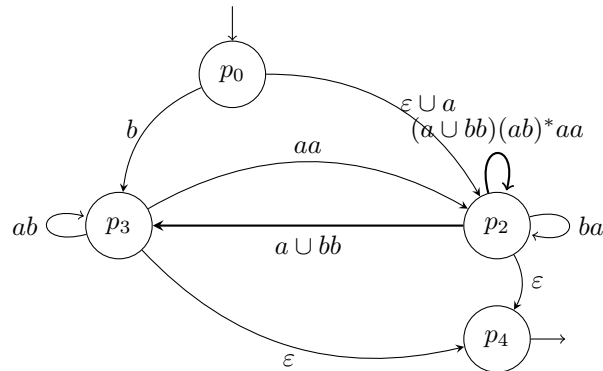


FIGURE 41.

Eftersom vi inte kan nå något mer än  $p_4$  via  $\varepsilon$  efter att ha avläst  $(a \cup bb)(ab)^*$  kan vi nu ta bort den pilen (fetmarkerad i Figure 41) och skapa en pil från  $p_2$  till  $p_4$ :

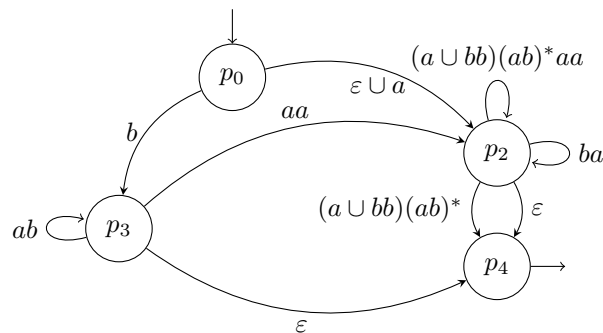


FIGURE 42.

Vi vill nu försöka få bort pilen över den vi just tog bort, den går från  $p_3$  till  $p_2$  så vi måste se till att de strängar vi kan läsa för att komma till  $p_3$  leder till  $p_2$

Vi noterar att vi kan avläsa  $baa$  för att komma till  $p_2$  från  $p_3$ , men vi kan ju också läsa  $babaa$  och oändligt antal fler loopar runt  $ab$ , så vi skapar en pil från  $p_0$  till  $p_2$  med  $b(ab)^*aa$ :

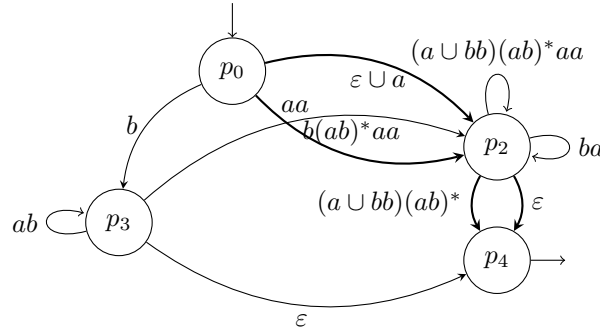


FIGURE 43.

Men vi har nu 2 olika pilar som går från samma till samma nod, vi kan slå ihop dessa till en enda:

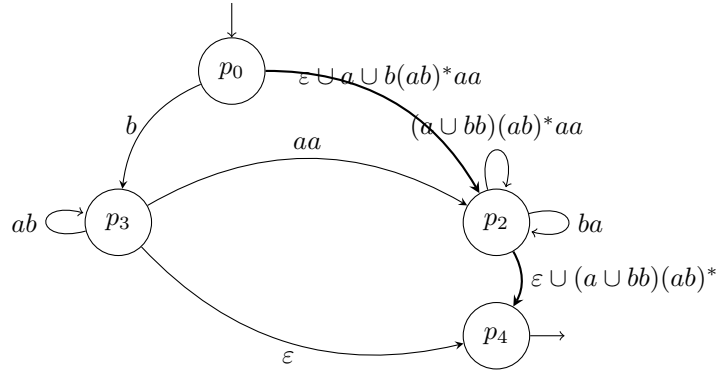


FIGURE 44.

Notera att vi kan ta vägen  $bε$  (men också givetvis loopa runt  $p_3$  med  $ab$  hur mycket som helst eller hur lite som helst), detta bevarar vi genom att dra en pil från  $p_0$  till  $p_4$  med  $b(ab)^*$ .

Vi kan även ta bort pilarna från  $p_0$  till  $p_3$ , pilarna från  $p_3$  till  $p_2$ , samt pilarna från  $p_3$  till  $p_4$ :

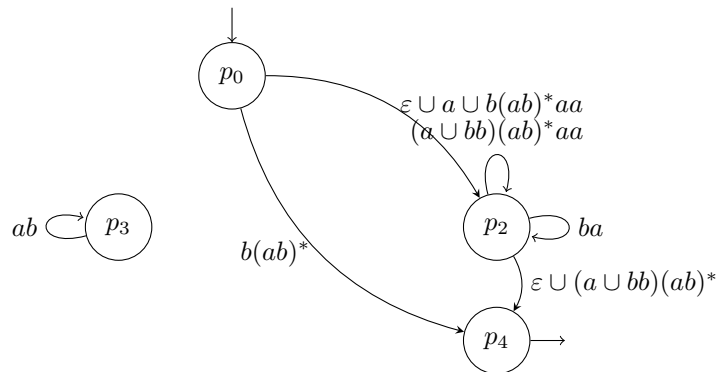


FIGURE 45.

$p_3$  är nu ensamt och vi kan ta bort den:

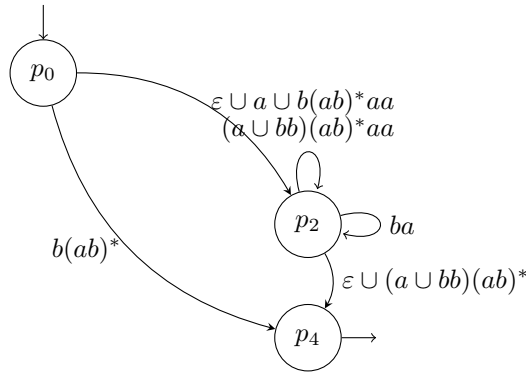


FIGURE 46.

Notera att vi har två loopar på  $p_2$ , detta kan vi förenkla till en genom att använda union:

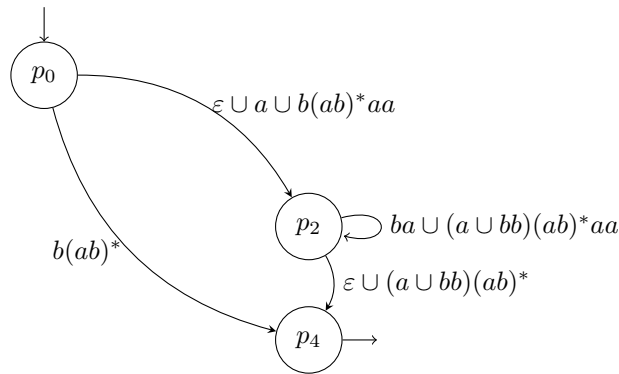


FIGURE 47.

Dags att börja eliminera  $p_2$ ! De pilar som går in i  $p_2$  är en pil från  $p_0$ , och de pilar som går ut är en pil till  $p_4$ , alltså bör vi kunna avläsa strängen  $\epsilon \cup a \cup b(ab)^*aa \epsilon \cup (a \cup bb)(ab)^*$  för att ta oss från  $p_0$  till  $p_4$  via  $p_2$ , men vi har ju även en loop, alltså måste vi slänga in  $(ba \cup (a \cup bb)(ab)^*aa)^*$ :

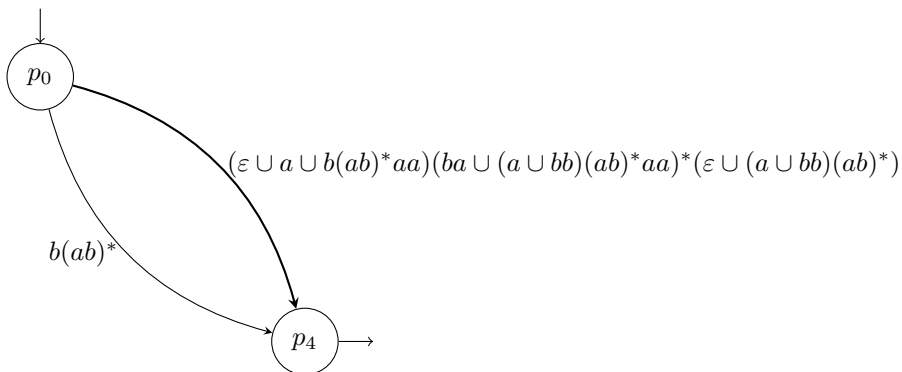


FIGURE 48.

Vi har nu 2 alternativa vägar från  $p_0$  till  $p_4$ , antingen vägen med det långa reguljära uttrycket, eller den korta med  $b(ab)^*$ . Har vi en nod som går till en annan med 2 olika pilar kan dessa kombineras med union. Man kan tänka på union som ett "eller", det vill säga  $b(ab)^* \cup Q$  kan översättas till " $b(ab)^*$  eller  $Q$ "

Gör vi detta får vi:

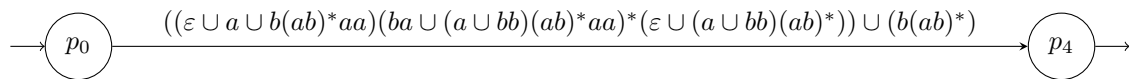


FIGURE 49.

Vi har nu ett starttillstånd, ett accepterande tillstånd, och inga andra noder. Bara en pil som kopplar de 2 tilltånden, och texten över den är det reguljära uttrycket för den ursprungliga NFA:n

## 9. ANALYS AV REGULJÄRA UTTRYCK

Om  $L$  är ett reguljärt uttryck  $\Leftrightarrow L$  accepteras av någon NFA  $\Leftrightarrow L$  accepteras av någon DFA. Detta väcker frågan, vad är den minsta DFA:n vi kan skapa givet ett reguljärt uttryck?

## 9.1. Minimering av DFA.

**Definition/Sats 9.1**

En DFA  $M$  är *minimal* om det inte finns en DFA som accepterar samma som  $M$  och har färre tillstånd än  $M$

**Definition/Sats 9.2**

Låt  $M$  vara en DFA och  $w$  en sträng ( $w$  är en sträng över  $M$ 's alfabet).

Vi säger att  $w$  *driver* DFA:n  $M$  från ett tillstånd  $p$  till ett annat  $q$  om när  $M$  startas i tillstånd  $P$  med  $w$  på tapen så stannar  $M$  i tillstånd  $q$

**Exempel:**

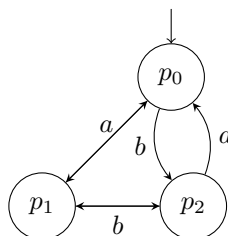


FIGURE 50.

Här driver strängen  $aaa$   $M$  från  $p_2$  till  $p_0$ . Strängen  $ab$  driver  $M$  från  $p_2$  till  $p_2$

Om ingen sträng driver  $M$  från starttillstånd till  $q$  så kallas  $q$  för *isolerat* tillstånd.

**Exempel:**

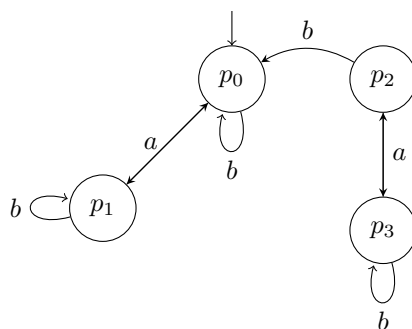


FIGURE 51.

Notera här att  $p_2$  och  $p_3$  är isolerade tillstånd! Då kan vi lika gärna plocka bort de utan att det påverkar vilka strängar som accepteras.

**Definition/Sats 9.3: Reduktion av ett tillstånd (om möjligt)**

Låt  $M$  vara en DFA (utan isolerade tillstånd) och antag att  $p$  och  $q$  är olika tillstånd i  $M$ .  
Antag att följande villkor gäller för varje sträng  $w$  (även  $\varepsilon$ ):

- $w$  driver  $M$  från  $p$  till ett accepterande tillstånd om och endast om  $w$  driver  $M$  från  $q$  till ett accepterande tillstånd

Låt nu  $M'$  vara som  $M$  utom att  $q$  tas bort, och varje övergång i Figure 52 ersätts med Figure 53.  
Då gäller  $L(M') = L(M)$  och  $M'$  har färre tillstånd än  $M$

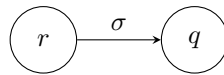


FIGURE 52.

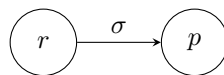


FIGURE 53.

Detta påminner lite om tillståndeliminering, men vi vill inte skapa reguljära uttryck utan det är ok att bara koppla bort pilarna från en nod till en annan.

**Definition/Sats 9.4: Särskiljandealgoritmen för minimering av en DFA**
**Exempel:**

Låt  $M$  vara följande DFA:

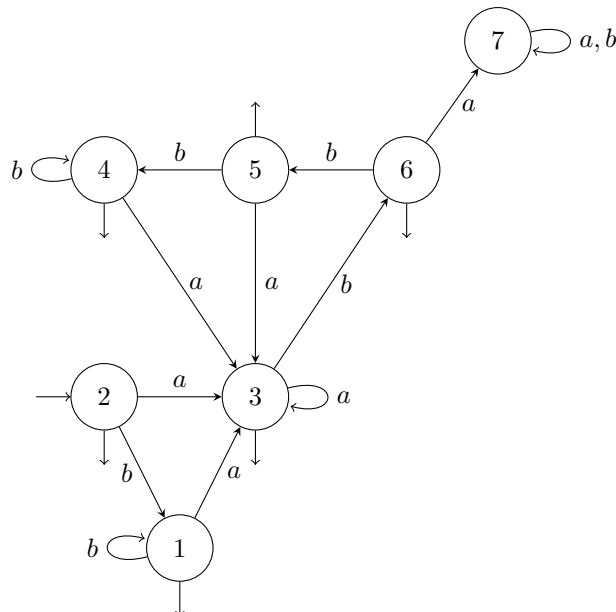


FIGURE 54.

Här är det enklare att skriva en tabell över tillståndsövergångarna:



	1	2	3	4	5	6	7
$a$	3	3	3	3	3	3	7
$a$	1	1	6	4	4	5	7

Nivå	Sönderdelningar
1	$\{7\} \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ (initial & accept. tillst)
2	$\{7\} \{1, 2, 3, 4, 5\} \{6\}$
3	$\{7\} \{1, 2, 4, 5\} \{3\} \{6\}$
4	$\{7\} \{1, 2, 4, 5\} \{3\} \{6\}$

Hur bildas nivå  $n + 1$  efter att nivå  $n$  är bildad?

- Om två tillstånd tillhör olika delar på nivå  $n$ , så gör de även det på nivå  $n + 1$
- Antag att  $p$  och  $q$  är tillstånd som tillhör samma del på nivå  $n$ ,  $p$  och  $q$  ska särskiljas, dvs placeras i olika delar på nivå  $n + 1$  om det finns ett  $\sigma \in \Sigma$  som driver DFA:n från  $p$  till en annan del på nivå  $n$  än  $\sigma$  som driver DFA:n från  $q$

Efter att vi kom till nivå 4 såg vi att vi inte fick några ändringar, nu kan vi konstruera en DFA  $M'$  som är minimal.

$M'$ 's tillstånd är delarna på den sista nivån (nivå 4).

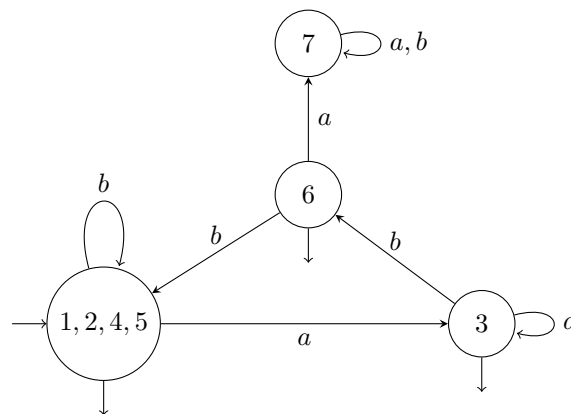


FIGURE 55.

Starttillståndet hos  $M'$  är den del/mängd som innehåller  $M$ 's starttillstånd. Samma gäller för accepterande tillstånd.

Givet en del/mängd  $P$  och tecken  $\sigma$  så lägg till en övergång  $P \rightarrow Q$  via  $\sigma$  där  $Q$  är den unika del sp att det finns  $p \in P$  och  $q \in Q$  så att övergången från  $p \rightarrow q$  via  $\sigma$  finns i  $M$

### Övning:

Betrakta följande tillståndsövergångstabell:

	1	2	3	4	5	6	7	8
$a$	1	1	2	3	5	7	8	2
$b$	1	4	6	5	5	5	6	6

Tillstånd 4, 6, 7 är accepterande och tillstånd 4 är starttillståndet. Vi utför algoritmen:

Nivå	Sönderdelningar
1	$\{1, 2, 3, 5, 8\} \{4, 6, 7\}$
2	$\{1, 5\} \{2, 3, 8\}$
3	$\{1, 5\} \{2\} \{3, 8\} \{4\} \{6\} \{7\}$

DFA:n blir följande:

När man väl är klar med konstruktionen så spelar det ingen roll vad tillstånden kallas (det vill säga, man behöver inte använda namnet som är mängder utan man får lov att säga  $p_0$  osv)

### Definition/Sats 9.5

Låt  $L$  vara ett språk över något alfabet  $\Sigma$ . Två strängar över alfabet  $(x, y \in \Sigma^*)$  *särskiljs* av  $L$  om det finns  $z \in \Sigma^*$  så att precis en av  $xz$  och  $yz$  tillhör språket  $L$ .

Notera! Alla dessa strängar är tillåtna att vara  $\varepsilon$

### Definition/Sats 9.6

En mängd  $A \subseteq \Sigma^*$  särskiljs av  $L$  om för varje par  $x, y \in A$  så att  $x \neq y$  så finns någon sträng  $z$  så att Definition 9.5 gäller (det finns  $z \in \Sigma^*$  så att precis en av  $xz$  och  $yz$  tillhör  $L$ )

#### Exempel:

Låt  $L_1 = \{w \in \{a, b\}^* : |w| \equiv_{\text{mod } 3} 0\}$ . Låt  $x = aa$  och  $y = a$ , här är  $x \neq y$  och vi påstår att den särskiljs av  $L$  eftersom vi kan hitta  $z$  så att  $xz \in L_1$  men att  $yz \notin L_1$ .

Välj exempelvis  $z = a$ , då är  $xz = aaa$  och  $|xz| = 3 \equiv 0$ , men  $yz = aa$  som  $|yz| \equiv 2 \neq 0$

#### Exempel:

Låt  $L_2 = \{w \in \{a, b\}^* : w \text{ innehåller minst 2 a:n}\}$  Låt  $x = aab$  och  $y = ab$  Om  $z = \varepsilon$  så särskiljs  $x$  och  $y$  av  $L_2$

#### Exempel:

Låt  $A = \{a, aa, aaa\}$ . Vi påstår att den här mängden särskiljs av  $L_1$

För att visa detta måste vi visa att varje par har ett  $z$  så att Definition 9.5 gäller.

För att underlätta gör vi en tabell:

	$a$	$aa$	$aaa$
$a$	X	$a$	$\varepsilon$
$aa$		X	$\varepsilon$
$aaa$			X

Notera att diagonalen inte fylls i. Tabellen visar exempel på  $z$  så att exakt en av  $xz$  och  $yz$  tillhör  $L_1$  om  $x \neq y$  och  $x$  är på lodräta axeln och  $y$  på vågräta axeln.

**Definition/Sats 9.7**

Antag att mängden  $A$  särskiljs av språket  $L$  och att  $A$  innehåller  $n$  strängar (de är givetvis över samma alfabet).

Då måste varje DFA  $M$  sådant att  $L(M) = L$  ha minst  $n$  tillstånd.

Det följer att om  $L(M) = L$  och  $M$  har exakt  $n$  tillstånd så är  $M$  minimal

Det följer då från satsen (och de föregående exempel) att varje DFA som accepterar  $L_1$  (från föregående exempel) har minst 3 tillstånd.

Eftersom följande DFA accepterar  $L_1$  och har 3 tillstånd, så är den minimal.

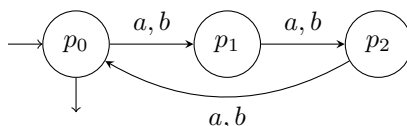


FIGURE 56.

**Proof 9.1: Sats 9.7**

Antag att  $A \subseteq \Sigma^*$  som särskiljs av  $L$ . Antag även att  $A$  innehåller minst  $n$  strängar. Låt  $M$  vara en DFA som accepterar  $L$ .

Låt  $A = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ . Så om  $x_i, x_j \in A$  och  $i \neq j$  så finns något  $z \in \Sigma^*$  så att precis en av  $x_i z$  och  $x_j z$  tillhör  $L$ , dvs accepteras av  $M$

Det betyder ju att när vi läser av  $x_i$  resp.  $x_j$  så kommer vi till olika tillstånd på grund av att bara en av de accepteras av  $M$ . Kommer man till samma tillstånd skulle båda strängar accepteras eller ingen av de.

Alternativt, det betyder att  $x_i$  driver  $M$  från starttillståndet  $s$  till ett annat tillstånd än vad  $x_j$  driver  $M$  från  $s$ . Därför måste det finnas minst  $n$  tillstånd i  $M$ .  $\square$

Vad händer om det finns en oändligt stor mängd  $A$  som särskiljs av ett visst språk?

## 10. SLUTENHETSEGENSKAPER HOS REGULJÄRA SPRÅK

Vi vet att operationerna på språken gör att vi får ett reguljärt språk, det följer ur definitionen av ett reguljärt språk.

Men! Det visar sig att om man har ett reguljärt språk så kommer komplementet vara reguljärt, det följer *inte* från definitionen!

Antag att  $L_1$  och  $L_2$  är reguljära språk. Från definitionen reguljära språk, följer det att även  $L_1 \cup L_2$ ,  $L_1 L_2$ ,  $L_1^*$  och  $L_1^+$  är reguljära.

Det finns dock fler slutenhetsegenskaper:

**Definition/Sats 10.1**

Om  $L_1$  och  $L_2$  är reguljära, så är  $\bar{L}_1$  (på samma sätt för  $L_2$ ), och  $L_1 \cap L_2$ ,  $L_1^{\text{rev}} = \{w^{\text{rev}} : w \in L_1\}$ ,  $\text{Prefix}(L_1)$ ,  $\text{Suffix}(L_1)$ .  
Alla dessa är reguljära.

**Bevisskiss:**

Vi tittar först på komplementet. Om  $L_1$  är reguljärt, så finns en DFA  $M_1$  som accepterar  $L_1$ . Vi kan därför konstruera en DFA med starttillstånd  $M_1$  som accepterar komplementet.

Vi påminner oss om att om  $w \in L_1 \Leftrightarrow M_1$  accepterar  $w \Leftrightarrow w$  driver  $M_1$  från  $s$  till ett accepterande tillstånd.

Låt  $M'_1$  vara DFA:n som fås från  $M_1$  genom att göra alla  $M_1$ :s accepterande tillstånd till icke-accepterande och göra alla  $M_1$ :s icke-accepterande tillstånd till accepterande. Då accepteras  $\bar{L}_1$  av  $M'_1$  och därmed är  $\bar{L}_1$  reguljärt.

**Bevisskiss:**

Vi tittar nu på snittet. Antag att  $L_1$  och  $L_2$  är reguljära. Enligt det vi visade i bevisskiss ovan så är  $\bar{L}_1$  och  $\bar{L}_2$  reguljära. Enligt definitionen av reguljära språk, så är  $\bar{L}_1 \cup \bar{L}_2$  och då är även komplementet av unionen också reguljärt. Men, snittet  $L_1 \cap L_2$  är ju komplementet till unionen.

**Anmärkning:**

Snittet av 2 reguljära uttryck är *inte* ett reguljärt uttryck, men snittet av 2 reguljära språk är reguljära.

### 10.1. Konstruktion av en "snitt"-DFA.

Givet input: Två DFA:er  $M_1$  resp.  $M_2$ :

$M_1$ :

$M_2$

En DFA som accepterar  $L(M_1) \cap L(M_2)$  med ordnade par från vardera DFA. Starttillståndet blir tillståndet med starttillstånd från vardera DFA. Lägga till alla kombinationer, och ta bort de isolerade tillstånden. I vårt fall får vi:

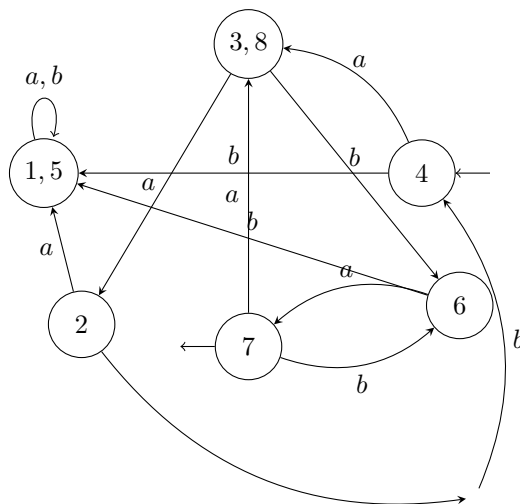


FIGURE 57.

## 11. REGULJÄRA SPRÅKENS GRÄNSER

**Definition/Sats 11.1: Särskiljandesatsen**

Låt  $L$  vara ett språk över alfabetet  $\Sigma$  och låt  $A$  vara en oändlig delmängd av strängar över  $\Sigma$  ( $A \subseteq \Sigma^*$ ).

Om  $L$  särskiljer  $A$ , så kan  $L$  inte vara reguljär

**Beviskiss:**

Antag att vi har en mängd  $A = \{x_1, x_2, \dots\}$  som innehåller oändligt antal strängar. Om  $A$  särskiljs av språket  $L$  och vi har en DFA som accepterar  $L$ , då skulle varje par av strängar  $x_i, x_j$  i  $A$  så måste  $x_i$  driva DFA:n från starttillståndet till ett tillstånd. Samma med  $x_j$ , men vi hamnar ju i olika tillstånd (vi antar även att  $x_i \neq x_j$ ). En DFA har däremot bara ändligt många tillstånd. DFA:n kan inte acceptera ett språk som särskiljer en oändlig mängd.

**Exempel:**

Ett exempel på ett icke-reguljärt språk är  $L = \{a^n b^n : n \in \mathbb{N}\}$ . Notera att  $a * b^*$  inte är ett reguljärt uttryck för språket  $L$ , eftersom med det reguljära uttrycket kan vi uttrycka  $abb$ , vilket vi inte kan per definition i  $L$ .

Detta är dock inte ett bevis, men vi kan använda satsen för att faktiskt bevisa att  $L$  ej är reguljärt.

Låt  $A = \{a^n : n \in \mathbb{N}\}$ , som är oändlig.

Vi visar nu att  $A$  särskiljs av  $L$ , då följer det från satsen att  $A$  inte är reguljärt. Detta kan vi göra genom att ta två skilda strängar  $x, y \in A$   $x \neq y$

Då finns naturliga tal  $i, j \in \mathbb{N}$  där  $i \neq j$  så att  $x = a^i$  och  $y = a^j$ . Välj då exempelvis  $z = b^i$ . Vi får då att  $xz = a^i b^i \in L$  och  $yz = a^j b^i \notin L$

Eftersom  $i, j$  valdes godtycklig, så särskiljs  $A$  av  $L$ . Det följer då från särskiljandesatsen att  $L$  inte är reguljärt.

**Exempel:** (och liten inledning till pumpsatsen)

Betrakta följande DFA:

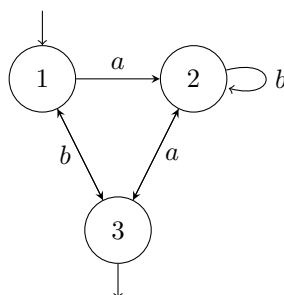


FIGURE 58.

Antalet kombinationer av tecken och tillstånd är  $2 \cdot 3 = 6$ . Följande sträng accepteras:

$\underbrace{abbaababa}_u \underbrace{baaabba}_w \underbrace{babb}_v$   
 122232231223231322313

Välj en delsekvens som har längd större än 6. Vi kallar den strängen  $w$ :

$baaabba \quad |baaabba| = 7 > 6$

Vi kallar de övriga delarna  $u$  och  $v$

Ur lådprincipen följer det att eftersom  $|w| > 6$  så kommer någon kombination av tecken/tillstånd uppträda minst 2 gånger. Vi måste alltså "loopa" ett tillstånd minst 2 gånger när  $w$  avläses. Exempelvis dyker kombinationen  $(a, 3)$  två gånger.

Vad vi ska göra nu är att dela upp  $w$  i 3 delar baserat på detta:

$$\underbrace{ba}_x \underbrace{aabb}_y \underbrace{a}_z$$

Låt delen av  $w$  fram till just före 1:a förekomsten av  $(a, 3)$ , vi kallar den  $x$ . Låt delen av  $w$  från 1:a förekomsten av  $(a, 3)$  till just före 2:a förekomsten av  $(a, 3)$ , vi kallar den  $y$ . Resten av  $w$  kallas för  $z$ .

På grund av att DFA:n är deterministisk så accepteras även  $uxyyzv$ . Faktum är att vi kan haka på hur många  $y$  som helst, vi kan även ta bort  $y$  och strängen kommer fortfarande att accepteras.

### Definition/Sats 11.2: Pumpsatsen för reguljära språk

Antag att vi har ett oändligt reguljärt språk  $L$ . Att det är oändligt garanterar att språket innehåller strängar av hur lång längd som helst, annars hade vi kunnat hitta ett supremum.

Då finns ett naturligt tal  $N \in \mathbb{N}$  sådant att om vi har en sträng  $uvw \in L$  och  $|w| \geq N$  så finns strängar  $x, y, z$  så att  $w = xyz$  och  $y \neq \varepsilon$  och  $uxy^n zv \in L$  för alla naturliga tal  $n \in \mathbb{N}$ .

Om  $n = 0$  får vi  $uxzv \in L$

Mall för att visa med pumpsatsen att ett språk  $L$  inte är reguljärt:

- Visa att  $L$  är oändligt
- Antag att  $L$  är reguljärt
- Låt  $N$  vara talet som anges (för  $L$ ) i pumpsatsen
- Välj lämpliga (konkreta upp till att  $N$ 's värde är okänt) strängar  $u, w, v$  sådant att  $uvw \in L$  och  $|w| \geq N$
- Visa att hur än  $w$  delas upp i 3 delar ( $w = xyz$  där  $y \neq \varepsilon$ ) så finns något tal  $k \in \mathbb{N}$  så att  $uxy^k zv$  inte tillhör  $L$
- Anmärk att det motsäger pumpsatsen eftersom  $L$  antogs vara reguljärt.

### Exempel:

Låt  $L = \{a^n b^n : n \in \mathbb{N}\}$ . Vi vill visa att  $L$  inte är reguljärt med pumpsatsen.

Vi följer mallen:

- Vi visar att  $L$  är oändligt:  
 $ab, a^2b^2, a^3b^3, \dots \in L$  så  $L$  oändlig
- Vi antar att  $L$  är reguljärt
- Låt  $N$  vara givet för  $L$  av pumpsatsen
- Vi kan tänka oss att pumpa ett  $a$  i en given sträng, eftersom vi inte pumpar  $b$  så kommer alltså vår nya sträng inte att finnas i  $L$ .  
Alltså, låt  $u = \varepsilon$ ,  $w = a^{N+1}$ ,  $v = b^{N+1}$  (notera att dessa är inte konkreta eftersom vi inte vet vad  $N$  är)  
Så  $uvw = a^{N+1}b^{N+1} \in L$  och  $|w| \geq N$
- Antag att vi har en uppdelning av  $w = xyz$  där  $y \neq \varepsilon$ . Då gäller att  $y = a^m$  för något  $m > 0$  och  $uxy^0 zv = uxzv = a^{N+1-m}b^{N+1} \notin L$
- Eftersom uppdelningen skedde godtyckligt, motsäger detta pumpsatsen, alltså måste  $L$  vara irreguljärt.

### Exempel:

Låt  $L$  vara språket med *minst* lika många  $b$  som  $a$ , dvs  $L = \{w \in \{a, b\}^* : \text{antalet } b \text{ i } w \text{ är minst lika stort som antalet } a\}$

Språket är inte ändligt och är inte reguljärt, vi visar detta med pumpsatsen.

- Antag att  $L$  är reguljärt
- Låt  $N$  vara givet för  $L$  av pumpsatsen
- Låt  $u = \varepsilon$ ,  $w = a^{N+1}$ ,  $v = b^{N+1}$ , så  $uvw = a^{N+1}b^{N+1} \in L$  och  $|w| \geq N$
- Antag att  $w = xyz$  där  $y \neq \varepsilon$ . Så  $y = a^m$  för  $m > 0$ . Vi får nu att  $uxy^2 zv \notin L$
- Detta motsäger antagandet att  $L$  är reguljärt, därmed följer det från pumpsatsen att  $L$  inte är reguljärt.

## 12. GRAMMATIKER

Detta är ett nytt sätt att se på språk. Tidigare har vi haft reguljära uttryck som beskriver ett språk, och finita automater som läser dessa.

När vi istället tittar på grammatiker så talar de om hur nya strängar kan skapas från tidigare strängar. Då kommer vi inte tänka oss att vi accepterar strängar utan att vi producerar strängar givet grammatik.

**Definition/Sats 12.1: Produktionsregel**

En *produktionsregel* är en sträng/uttryck på formen:

$$u \rightarrow v$$

där  $\rightarrow$  inte förekommer i strängarna  $u$  och  $v$ .

**Definition/Sats 12.2: Grammatik**

En *grammatik* är en 4-tupel  $G = (\Sigma_N, \Sigma_T, P, S)$  där:

- $\Sigma_N$  är ändlig mängder av symboler  $n$  står för "non-terminating"
- $\Sigma_T$  är ändlig mängder av symboler  $T$  står för "terminating"
- $P$  är ändlig mängd av produktionsregler  $u \rightarrow v$  där  $u, v \in \Sigma_N \cup \Sigma_T$  där  $u \neq \varepsilon$
- $S \in \Sigma_n$ , kallas för startsymbol

**12.1. Produktion av strängar.**

Vad är vitsen och hur fungerar det? Vi kommer i slutet vara intresserade av strängar som enbart är terminerande

Låt  $G = (\Sigma_N, \Sigma_T, P, S)$  vara en grammatik:

**Definition/Sats 12.3**

En sträng  $v$  kan produceras från en sträng  $u$  i ett steg, betecknas  $u \Rightarrow v$  om  $u = xy_1z$  och  $v = xy_2z$  och det finns en produktionsregel  $\in P$  som är på formen  $y_1 \rightarrow y_2$

**Definition/Sats 12.4**

Vi säger att  $v$  kan produceras i noll eller flera steg från en annan sträng  $u$ , betecknat  $u \Rightarrow^* v$ , om:

- $u = v$
- $\exists n \geq 2, n \in \mathbb{N}$  och strängar  $w_1, \dots, w_n$  så att  $u = w_1 \Rightarrow w_2 \Rightarrow \dots \Rightarrow w_n = v$

**Definition/Sats 12.5**

Språket som  $G$  definierar är  $L(G) = \{w \in \Sigma_T^* : S \Rightarrow^* w\}$

Kan kallas för "G:s språk" eller "språket som  $G$  producerar/beskriver".

**Exempel:**

Låt  $L = \{a^n b^n : n \in \mathbb{N}\}$ . Vi såg att detta språk  $L$  inte var reguljärt. Det finns alltså inte en finit automat som accepterar språket. Det går heller inte att beskriva med ett reguljärt uttryck, men vi kan faktiskt ge en grammatik som producerar strängarna i det här språket.

Låt  $G = (\Sigma_N, \Sigma_T, P, S)$  där:

$$\Sigma_N = \{S\}, \Sigma_T = \{a, b\}, P = \{S \rightarrow aSb, S \rightarrow \varepsilon\}$$

Vi ska nu motivera varför denna grammatik producerar bara strängar i  $L$ .

Vi ser att om  $w \in \Sigma_T^*$  kan produceras av  $G$ , dvs om  $S \Rightarrow^* w$ , så måste  $w = a^n b^n$



Säg att vi börjar med  $S$ , då kan jag antingen ta bort  $S$  och få  $\varepsilon = a^0b^0$ , eller så kan jag använda första regeln och få  $aSb$ . Då kan jag antingen plocka bort  $S$  och få  $ab$ , eller så kör jag första regeln igen och får  $aaSbb$  och så fortsätter det...

Alltså kommer vi alltid få något på  $a^n b^n$ .

Ett induktionsbevis för att  $a^n b^n \in L(G) \quad \forall n \in \mathbb{N}$ :

Basfall: Om  $n = 0$  så  $S \Rightarrow^* S = a^0 S b^0$  och  $S \Rightarrow \varepsilon$ , så  $\varepsilon \in L(G)$

Induktions steg: Antag att  $S \Rightarrow^* a^n S b^n$ . Med regeln  $S \Rightarrow aSb$  följer att  $a^n S b^n \Rightarrow a^{n+1} S b^{n+1}$

Från  $S \Rightarrow^* a^n S b^n \Rightarrow a^n b^n \quad \forall n \in \mathbb{N}$  följer att  $a^n b^n \in L(G)$ .

Notera, detta visar enbart att  $L \in L(G)$

Detta är ett exempel på ett så kallat *sammanhangsfri grammatik* och språket är ett *sammanhangsfritt språk*.

## 12.2. Sammanhangsfria grammatiker och språk.

### Definition/Sats 12.6

En produktionsregel kallas *sammanhangsfri* om den har formen  $A \rightarrow w$  där  $A$  är en icke terminerande symbol ( $A \in \Sigma_N$ ) och  $A$  bara är ett tecken

### Definition/Sats 12.7: Sammanhangsfri grammatik

En grammatik är sammanhangsfri om alla dess regler är sammanhangsfria. (CFG, Context Free Grammar)

### Definition/Sats 12.8: Sammanhangsfritt språk

Ett språk  $L$  kallas sammanhangsfritt om det kan produceras med en sammanhangsfri grammatik  $G$ . (CFL, Context Free Language)

Från föregående exempel, följer det att  $L$  är sammanhangsfritt.

### Definition/Sats 12.9

Varje reguljärt språk är sammanhangsfritt

**Exempel:**

Antag att  $L$  är reguljärt. Då finns en DFA  $M$  så att DFA:ns språk  $L(M) = L$ .  
Låt  $M$  vara följande DFA:

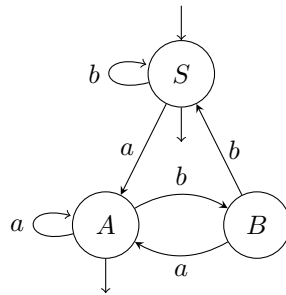


FIGURE 59.

Vi omvandlar  $M$  till en CFG:  $G = (\Sigma_n, \Sigma_T, P, S)$  genom att låta:

- $\Sigma_n = \{S, A, B\}$
- $\Sigma_T = \text{DFA:s alfabet } \{a, b\}$

och där varje tillståndsovergång i  $M$  motsvaras av en produktionsregel på följande sätt:  
Övergången blir med produktionsregel  $S \rightarrow aA$

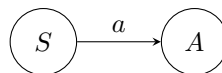


FIGURE 60.

På liknande sätt får vi också följande produktionsregler:

- $A \rightarrow bB$
- $B \rightarrow aA$
- $B \rightarrow bS$
- $\vdots$
- $S \rightarrow \varepsilon$  (accepterande tillstånd)
- $A \rightarrow \varepsilon$  (accepterande tillstånd)

Vi bör få  $3 * 2$  regler, kardinaliteterna  $\Sigma_N * \Sigma_T$

Betrakta nu sträng  $baaba$  (som accepteras av  $M$ ), notera att denna sträng även produceras av  $G$ :

- $baaba \quad S$
- $aaba \quad S$
- $aba \quad A$
- $ba \quad A$
- $a \quad B$
- $\quad A$

Vilket blir, grammatiskt:

- $S \rightarrow bS \rightarrow baA \rightarrow baaA \rightarrow baabB \rightarrow baabB \rightarrow baabaA \rightarrow baaba\varepsilon = baaba$

**Exempel:**

Låt  $L = \{w \in \{a, b\}^* : w^{\text{rev}} = w\}$

En CFG  $G$  så att  $L(G) = L$

Notera att första tecknet måste vara lika med det sista tecknet i ett palindrom och att palindrom kan ha både udda och jämn längd. Vi inför följande produktionsregler:

- $S \rightarrow \varepsilon$
- $S \rightarrow aSa$
- $S \rightarrow bSb$
- $S \rightarrow a$
- $S \rightarrow b$

Produktion av  $ababa$ :  $S \Rightarrow aSa \Rightarrow abSba \Rightarrow ababa$

## 13. PUSHDOWNAUTOMATER [PDA]

## 13.1. En liten informell beskrivning:

**Definition/Sats 13.1: PDA**

En PDA har 2 taper, en för inputsträngen och en som kallas för *stacken* (ett slags minne).

En PDA har även 2 alfabet, 1 input-alfabet (det som används på input tapen) och ett stackalfabet (används på stacken)

Är icke-deterministisk, har ändligt många tillstånd, samt ändliga alfabet för både input& stackalfabet

När PDA:n jobbar så konsumerar den en delsträng, likt en NFA. Den avläser alltså inte högst ett tecken, utan kan avläsa flera.

Samtidigt som den avläser från inputtapen så byter den en delsträng överst på stacken med någon sträng. Samtidigt gör den även en tillståndsövergång.

Om vi struntar i stacken så fungerar en PDA som en NFA.

En PDA har dock enbart 1 starttillstånd. (Vera hävdar att detta är lite onödig konvention).

## 13.2. Grafisk beskrivning av PDA.

Ganska lik en NFA, men på pilarna måste vi lägga till vad som görs på stacken:

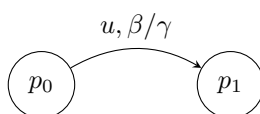


FIGURE 61. Byte av  $\beta$  mot  $\gamma$  överst i stacken

Såklart så är  $u$  sträng över inputalfabet och  $\beta, \gamma$  sträng över stackalfabet.

PDA:n kan gå från tillstånd  $p_0$  till  $p_1$  genom att avläsa strängen  $u$  på input-tapen ( $u$  måste börja där läshuvudet står på input-tapen) och ersätta  $\beta$  med  $\gamma$  överst på stacken (förutsätter att  $\beta$  står överst på stacken).

Det är tillåtet att  $u, \beta, \gamma$  är  $\varepsilon$

**Anmärkning:**

Om  $\beta$  inte finns överst på stacken, så kan inte den övergången tas.

### 13.3. Kriterier för acceptans hos PDA.

En PDA  $M$  accepterar en sträng  $w$  över inputalfabet om  $w$  kan delas upp  $w = v_1 \cdots v_n$  och man kan avläsa delarna  $v_1, v_2, \dots, v_n$  genom att följa övergångar:

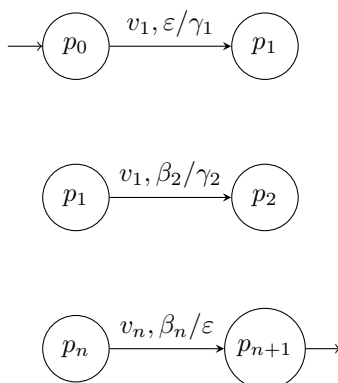


FIGURE 62.

där  $p_1$  är starttillstånd,  $p_{n+1}$  är accepterande och stacken är tom i början och när hela  $w$  har avlästs. Det är tillåtet att  $p_i = p_j$  även om  $i \neq j$

### 13.4. Språk hos PDA.

Om  $M$  är en PDA så  $L(M) = \{w : w \text{ är en sträng över } M\text{'s inputalfabet som accepteras av } M\}$   
 Detta är  $M$ 's språk.

#### Exempel:

Betrakta följande språk  $L = \{a^n b^n : n \in \mathbb{N}\}$  (icke-sammanhangsfritt språk).

*Konstruera en PDA som accepterar  $L$ :*

Iden är att vi bara vill läsa av så många  $a$  som möjligt, och sedan för varje  $a$  lägger vi till något i stacken. Då har vi koll på *hur många*  $a$  vi har läst. Låt  $M$  vara följande PDA:

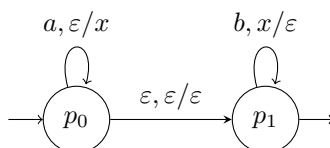


FIGURE 63.

Input-alfabet är  $\{a, b\}$  och stackalfabet är  $\{x\}$

Eftersom PDA:er är icke-deterministiska så finns det flera olika sätt att "köra" PDA:n. Vi ska kolla på hur denna körning ser ut:

Tillstånd	Input-tape	stacken
$p_0$	<b>a</b> abb	$\epsilon$
$p_0$	a <b>a</b> bb	$x$
$p_0$	aa <b>b</b> b	$xx$
$q$	aa <b>b</b> b	$xx$
$q$	aa <b>b</b> b	$x$
$q$	aa <b>b</b> b	$x$
$q$	aa <b>b</b> b	$\epsilon$

Denna körning vittnar om att **aabb** accepteras av  $M$ .

Däremot skulle **aaabb** inte accepteras av följande DFA, detta eftersom det kommer finnas ett för mycket  $x$  i stacken men inget  $b$  att byta ut mot  $\epsilon$ .

**Definition/Sats 13.2**

För varje CFG  $G$  så finns det en PDA  $M$  som har samma språk som  $G$ , dvs  $L(M) = L(G)$

Detta kan illustreras med en så kallad "top-down" parser metoden:

Låt  $G = (\Sigma_n, \Sigma_T, P, S)$  där  $P = \{A_1 \rightarrow w_1, A_2 \rightarrow w_2, \dots, A_n \rightarrow w_n\}$  och  $\Sigma_T = \{\sigma_1, \dots, \sigma_k\}$

För att konstruera  $M$  med detta, låter vi  $M$ 's inputalfabet vara  $\Sigma_T$  och  $M$ 's stackalfabet vara  $\Sigma_T \cup \Sigma_N$   
Låt  $M$  beskrivas med (kom ihåg,  $S$  är startsymbol):

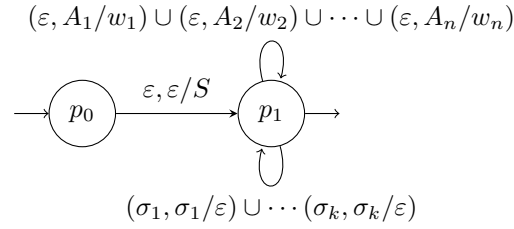


FIGURE 64.

Nu gäller att  $L(M) = L(G)$

**Exempel:**

Låt  $G$  vara följande CFG:

$$L(G) = \{a^n b^n : n \in \mathbb{N}\}$$

$$P = \{S \rightarrow aSb, S \rightarrow \varepsilon\}$$

Konstruera en PDA med samma språk som grammatiken  $G$  m.h.a top-down parser metoden:

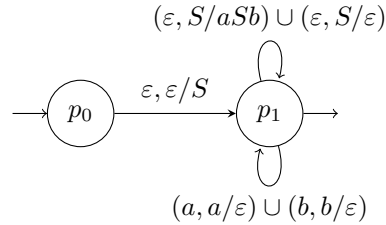


FIGURE 65.

**Definition/Sats 13.3**

För varje PDA  $M$  finns en CFG som har samma språk som  $M$ , dvs  $L(M) = L(G)$

Från Sats 13.3 följer det att ett språk är sammanhangsfritt (CFL)  $\Leftrightarrow$  någon PDA accepterar språket.