

Einführung in die Theoretische Informatik

Zusammenfassung

Ali, Mihir, Noah

June 2, 2022

Contents

1	Formale Sprachen	3
1.1	Grundbegriffe	3
1.1.1	Operationen auf Sprachen	3
1.1.2	Grammatiken	4
1.1.3	Chomsky Hierarchie	4
1.1.4	Wortproblem	5
2	Reguläre Sprachen	5
2.1	Deterministische endliche Automaten	5
2.1.1	Definition	6
2.2	Von rechtslinearen Grammatiken zu DFA	6
2.2.1	Nichtdeterministischer endlicher Automat	7
2.2.2	Satz 3.9	7
2.2.3	Satz 3.13	7
2.3	3.3 NFAs mit ϵ -Übergängen	7
2.3.1	Lemma 3.16	7
2.4	3.4 Regex	8
2.4.1	Definition 3.20	8
2.4.2	Satz 3.23 (Kleene 1956)	8
2.4.3	Wie teuer sind unsere Konversionen?	9
2.5	Abschlusseigenschaften regulärer Sprachen	9
2.5.1	Satz 3.24	9
2.5.2	Satz 3.24 Abschlusseigenschaften regulärer Sprachen	10
2.5.3	Satz 3.25	10
2.6	Rechnen mit Regulären Ausdrücken	10
2.6.1	Definition 3.26	10

2.6.2	Lemma 3.27	10
2.6.3	Lemma 2.8	10
2.7	Pumping Lemma	11
2.7.1	Satz 3.32 (Pumping Lemma für Reguläre Sprachen)	11
2.8	Entscheidungsverfahren	11
2.8.1	Definition 3.37	11
2.9	Automaten und Gleichungssysteme	12
2.9.1	Ardens Lemma (Satz 3.47)	12
2.9.2	Korollar 3.48	12
2.9.3	Algorithmus um RE aus Automat zu machen	12
2.10	Minimierung endlicher Automaten	12
2.11	Äquivalenztest von DFAs	12
2.12	Äquivalenz von Zuständen	12
2.13	Minimalität des Quotientenautomaten	13
2.13.1	Definition 3.55 (Äquivalenz von Wörtern bzgl. L)	13
2.13.2	Satz 3.56	13
2.14	Definition 3.57 (Kanonischer Minimalautomat)	13
2.14.1	Satz 3.58	13
2.15	Satz 3.59	13
3	Kontextfreie Sprachen	13
3.0.1	Syntaxbaum:	13
3.1	Definition 4.2	14
3.2	Definition 4.4	14
3.3	Definition 4.5 (Reflexiv transitive Hülle)	14
3.4	Definition 4.6 (Kontextfreie Sprache)	14
3.5	Lemma 4.9 (Dekompositionslemma)	14
3.6	Definition 4.12 (Balancierte Klammerausdrücke)	14
3.6.1	Präfix	14
3.6.2	Anzahl an Vorkommnissen	14
3.6.3	4,13	15
3.7	4.15 Syntaxbaum	15
3.8	4.17 Äquivalente Bedingungen	15
3.9	4.18	15
4	Chomsky-Normalform	15
4.0.1	4.21	15
4.0.2	4.22	16
4.0.3	Beispiel 4.24 Epsilonproduktion	16
4.0.4	Beispiel mit Farben weil Noah immernoch nicht versteht	16

4.0.5	4.25	16
4.0.6	Beispiel Kettenproduktionen:	17
4.0.7	Konstruktion einer Chomsky Normalform	17
4.1	Definition 4.27	17
4.1.1	Satz 4.28	18
4.2	Pumping Lemma für kontextfreie Sprachen	18
4.3	Abschlusseigenschaften kontextfreie Sprachen	18

1 Formale Sprachen

1.1 Grundbegriffe

- Alphabet Σ (endliche Menge) z.B. $\{1, 0\}$
- Wort/String über Σ ist eine endliche Folge von Zeichen aus Σ
- $|w|$ Länge des Wortes w
- Leeres Wort ϵ
- uv Konkatenation der Wörter u und w
- Ist w ein Wort so ist $w^0 = \epsilon$ und $w^{n+1} = ww^n$
- Σ^* Menge aller Wörter über Σ
- (formale) Sprache $L \subseteq \Sigma^*$

1.1.1 Operationen auf Sprachen

Seien $A, B \subseteq \Sigma^*$

- Konkatenation:

$$AB = \{uv | u \in A \wedge v \in B\}$$

- Konkatenation mit sich selbst:

$$A^n = \{w_1 \dots w_n | w_1, \dots, w_n \in A\} = A \dots A$$

- $A^* = \{w_1 \dots w_n | n \geq 0 \wedge w_1, \dots, w_n \in A\} = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A^n$
- $A^+ = AA^* = \bigcup_{n \geq 1} A^n$

1. Sonderfälle:

- $\forall A : \epsilon \in A^*$
- $\emptyset^* = \{\epsilon\}$
- $\emptyset A = \emptyset$
- $\{\epsilon\}A = A$
- $A^*A^* = A^* = (A^*)^*$

1.1.2 Grammatiken

4-Tupel $G = (V, \Sigma, P, S)$

- V ist endliche Menge von Nichtterminalzeichen
- Σ ist endliche Menge von Terminalzeichen (= Alphabet)
- $P \subseteq (V \cup \Sigma)^* \times (V \cup \Sigma)^*$ ist Menge von Produktionen
- $S \in V$ ist das Startsymbol

Die Sprache von G ist die Menge aller Wörter, die von G erzeugt werden. Sie wird mit $L(G)$ bezeichnet. Also jedes Wort, dass die Grammatik erzeugt muss in der Sprache erhalten sein und jedes Wort in der Sprache muss von der Grammatik erzeugt werden.

1. Reflexve transitive Hülle

- $\alpha \rightarrow_G^0 \alpha$
- $\alpha \rightarrow_G^{n+1} \gamma : \exists \beta. \alpha \rightarrow_G^n \beta \rightarrow_G \gamma$
- $\alpha \rightarrow_G^* \beta : \exists n. \alpha \rightarrow_G^n \beta$
- $\alpha \rightarrow_G^+ \beta : \exists n > 0. \alpha \rightarrow_G^n \beta$

1.1.3 Chomsky Hierarchie

Eine Grammatik G ist vom

- Typ 0 immer
- Typ 1 falls fpr jede Produktion $\alpha \rightarrow \beta$ außer $S \rightarrow \epsilon$ gilt $|\alpha| \leq |\beta|$
- Typ 2 Falls G vom typ 1 ist und für jede Produktion $\alpha \rightarrow \beta$ gilt $\alpha \in V$
- Typ 3 falls G vom Typ 2 ist und für jede Produktion $\alpha \rightarrow \beta$ außer $S \rightarrow \epsilon$ gilt $\beta \in \Sigma \cup \Sigma V$

1. Grammatiken und Sprachklassen:

Typ 3	Rechtslineare Grammatiken	Reguläre Sprachen
Typ 2	Kontextfreie Grammatik	Kontextfreie Sprachen
Typ 1	Kontextsensitive Grammatik	Kontextsens. Sprachen
Typ 0	Phrasenstrukturgrammatik	Rekursiv aufzählbare Sprachen

2. Satz 2.13 $L(Typ3) \subset L(Typ2) \subset L(Typ1) \subset L(Typ0)$

1.1.4 Wortproblem

Gegeben: eine Grammatik G , ein Wort $w \in \Sigma^*$ Frage: Ist das Wort in w enthalten ($w \in L(G)$)?

2 Reguläre Sprachen

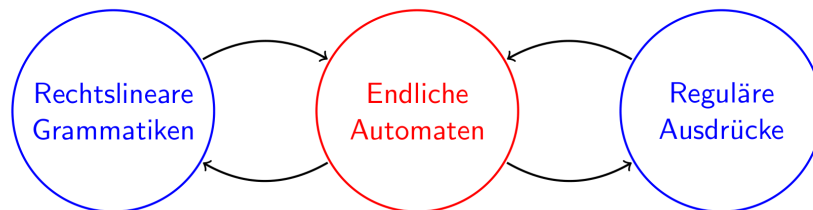


Figure 1: Reguläre Sprachen Schema

2.1 Deterministische endliche Automaten

- Beispiel:
 - Eingabewort $baba \rightarrow$ Zustandsfolge $0,0,1,2,2$
- “Bei dieser Grammatik muss mindestens nach einem a ein b kommen”
- Die Sprache des DFA ist die Menge aller Wörter über $\{a, b\}$, die ab enthalten

Erkannte Sprache: Menge der Wörter, die vom Startzustand in einen Endzustand führen. Recognizer, die nur einmal das Wort durchläuft und in linearer Zeit es akzeptiert oder ablehnt.

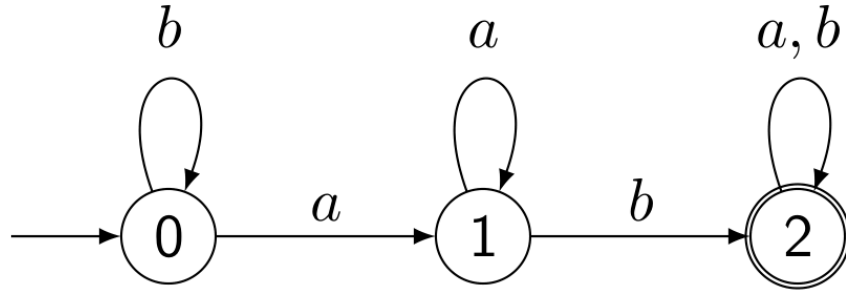


Figure 2: Beispiel Automat

2.1.1 Definition

Ein deterministischer endlicher Automat $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ besteht aus

- endliche Menge von Zuständen Q
- endlichem Eingabealphabet Σ
- einer totalen Übergangsfunktion $\delta : Q \times \Sigma \rightarrow Q$
- einem Startzustand $q_0 \in Q$
- einer Menge $F \subset Q$ von Endzuständen

1. Akzeptierte Sprachen (Definition 3.2) Von M akzeptierte Sprache $L(M) := \{w \in \Sigma^* \mid \hat{\delta}(q_0, w) \in F\}$ wobei $\hat{\delta} : Q \times \Sigma^* \rightarrow Q$ induktiv definiert ist:
 $\hat{\delta}(q, \epsilon) = q$
 $\hat{\delta}(q, aw) = \hat{\delta}(\delta(q, a), w)$, für $a \in \Sigma, w \in \Sigma^*$
 $(\hat{\delta}(q, w)$ bezeichnet den Zustand, den man aus q mit w erreicht.)
 Eine Sprache ist regulär **gdw** sie von einem DFA akzeptiert wird.
2. Beispiel Automat der Sprache akzeptiert Induktiv beweisen pro Zustand.

2.2 Von rechtslinearen Grammatiken zu DFA

- Für jede rechtslineare Grammatik G gibt es einen DFA M mit $L(M) = L(G)$
- Für jeden DFA M gibt es eine rechtslineare Grammatik G mit $L(G) = L(M)$

2.2.1 Nichtdeterministischer endlicher Automat

Ein deterministischer endlicher Automat $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ besteht aus

- Q, Σ, q_0, F sind wie DFA
- $\delta : Q \times \Sigma \rightarrow P(Q)$
 $P(Q)$ = Menge aller Teilmengen von $Q = 2^Q$
Alternative: Relation $\delta \subseteq Q \times \Sigma \times Q$

$$\bar{\delta}(S, a) := \bigcup_{q \in S} \delta(q, a)$$

Es folgt: $\hat{\delta} : P(Q) \times \Sigma^* \rightarrow P(Q)$

1. Intuition: $\hat{\delta}(S, w)$ ist Menge aller Zustände, die sich von einem Zustand in S aus w erreichen lassen.
2. Von nichtdeterministischen Automaten N akzeptierte Sprache $L(N) := \{w \in \Sigma^* \mid \hat{\delta}(\{q_0\}, w) \cap F \neq \emptyset\}$

2.2.2 Satz 3.9

Für jede rechtslineare Grammatik G gibt es einen NFA M mit $L(G) = L(M)$

2.2.3 Satz 3.13

Für jeden DFA M gibt es eine rechtslineare Grammatik G mit $L(M) = L(G)$

2.3 3.3 NFAs mit ϵ -Übergängen

Grammatiken von Programmiersprachen enthalten viele Produktionen der Gestalt $A \rightarrow B$.

Ein NFA mit ϵ -Übergängen (auch ϵ -NFA) ist ein NFA mit einem speziellen Symbol $\epsilon \notin \Sigma$ und mit $\delta : Q \times (\Sigma \cup \epsilon) \rightarrow P(Q)$. Ein ϵ -Übergang darf ausgeführt werden, ohne dass ein

2.3.1 Lemma 3.16

Für jeden ϵ -NFA N gibt es einen NFA N' mit $L(N) = L(N')$.

2.4 3.4 Regex

- \emptyset ist ein regex
- ϵ ist ein regex
- Für jedes $a \in \Sigma$ ist a ein regulärer Ausdruck
- Wenn α und β regex dann auch
 1. $\alpha\beta$
 2. $\alpha|\beta$
 3. α^*
- Sonst NIX!

2.4.1 Definition 3.20

Zu einem regulären Ausdruck γ ist die zugehörige Sprache $L(\gamma)$ rekursiv definiert:

- $L(\emptyset) = \emptyset$
- $L(\epsilon) = \{\epsilon\}$
- $L(a) = a$
- $L(\alpha\beta) = L(\alpha)L(\beta)$
- $L(\alpha|\beta) = L(\alpha) \cup L(\beta)$
- $L(\alpha^*) = L(\alpha)^*$

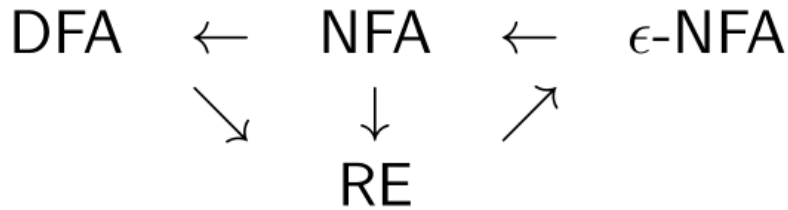
2.4.2 Satz 3.23 (Kleene 1956)

Eine Sprache $L \subseteq \Sigma^*$ ist genau dann durch einen regulären Ausdruck darstellbar, wenn sie regulär ist.

$$R_{ij}^{k+1} = R_{ij}^k \cup R_{i(k+1)}^k (R_{(k+1)(k+1)}^k)^* R_{(k+1)j}^k \text{ in } regex \cup = |$$

R_{ij}^{k+1} = alle Wörter die in R_{ij}^k sind plus alle Wörter die mindestens einmal q_{k+1} besuchen Somit gilt $L(M) = L(\alpha_{1i_1}^n | \dots | \alpha_{1i_r}^n)$, wobei $F = \{i_1, \dots, i_r\}$

2.4.3 Wie teuer sind unsere Konversionen?



- $RE \rightarrow \epsilon\text{-NFA}$: RE der Länge n , $O(n)$ Zustände
- $\epsilon\text{-NFA} \rightarrow \text{NFA}$: Q
- $\text{NFA} \rightarrow \text{DFA}$: $O(2^n)$
- $\text{FA} \rightarrow \text{RE}$: $O(n^4)$

2.5 Abschlusseigenschaften regulärer Sprachen

2.5.1 Satz 3.24

Seien $R, R_1, R_2 \subseteq \Sigma^*$ reguläre Sprachen. Dann sind auch

- $R_1 R_2$
- $R_1 \cup R_2$
- R^*
- $\bar{R} (:= \Sigma^* \setminus R)$
- $R_1 \cap R_2$
- $R_1 \setminus R_2$

reguläre Sprachen

1. Produkt-Konstruktion Für den Schnitt ist die De-Morgan regel zu teuer also kann man auch eine Produkt Konstruktion ohne Umweg über De-Morgen benutzen.

Das funktioniert über Parallelismus also beide DFAs laufen synchron parallel (kreuzprodukt der Zustandsräume).

2.5.2 Satz 3.24 Abschlusseigenschaften regulärer Sprachen

Seien $R, R_1, R_2 \subseteq \Sigma^*$ reguläre Sprachen. Dann sind auch $R_1 R_2, R_1 \cup R_2, R^k, \bar{R} := \Sigma^* \setminus R, R_1 \cap R_2, R_1 \setminus R_2$ auch reguläre Sprachen

2.5.3 Satz 3.25

Sind $M_1 = (Q_1, \Sigma, \delta_1, s_1, F_1)$ und $M_2 = (Q_2, \Sigma, \delta_2, s_2, F_2)$ DFAs, dann ist der **Produkt-Automat**

$$M := (Q_1 \times Q_2, \Sigma, \delta, (s_1, s_2), F_1 \times F_2) \\ \delta((q_1, q_2), a) := (\delta_1(q_1, a), \delta_2(q_2, a))$$

2.6 Rechnen mit Regulären Ausdrücken

2.6.1 Definition 3.26

Zwei reguläre Ausdrücke sind **äquivalent** gdw sie die gleiche Sprache darstellen:

$$\alpha \equiv \beta :\Leftrightarrow L(\alpha) = L(\beta)$$

(by the way \equiv steht für Bedeutungsäquivalenz und $=$ für syntaktische gleichheit)

2.6.2 Lemma 3.27

- $\emptyset | \alpha \equiv \alpha | \emptyset \equiv \alpha$
- $\emptyset \alpha \equiv \alpha \emptyset \equiv \emptyset$
- $\epsilon \alpha \equiv \alpha \epsilon \equiv \alpha$
- $\emptyset^* \equiv \epsilon$
- $\epsilon^* \equiv \epsilon$

2.6.3 Lemma 2.8

- Assoziativität
- Kommutativität
- Distributivität
 - $\alpha(\beta | \gamma) \equiv \alpha\beta | \gamma$
 - $(\alpha | \beta)\gamma \equiv \alpha\gamma | \beta\gamma$
- Idempotenz: $\alpha | \alpha \equiv \alpha$

2.7 Pumping Lemma

Wie zeigt man, dass eine Sprache nicht regulär ist?

2.7.1 Satz 3.32 (Pumping Lemma für Reguläre Sprachen)

Sei $R \subseteq \Sigma^*$ regulär. Dann gibt es ein $n > 0$, so dass sich jedes $z \in R$ mit $|z| \geq n$ so in $z = uvw$ zerlegen lässt, dass

- $v \neq \epsilon$,
- $|uv| \leq n$
- $\forall i \geq 0. uv^i w \in R$.

Es gibt nicht-reguläre Sprachen, für die das Pumping-Lemma gilt! \Rightarrow Pumping-Lemma hinreichend aber nicht notwendig um Nicht-Regularität zu zeigen.

regulär \subset Pumping-Lemma gilt \subset alle Sprachen

2.8 Entscheidungsverfahren

Eingabe: Ein oder mehrere Objekte, die Reguläre Sprachen beschreiben (DFA, NFA, RE Typ3 Gram, ...) **Frage:** Haben die Sprachen die Eigenschaft X? Ein (Entscheidungs-)Problem ist entscheidbar, wenn es einen Algorithmus gibt, der bei jeder Eingabe in endlicher Zeit die richtige Antwort auf die Frage feststellt.

Welche Entscheidungsprobleme sind für rechtslineare Grammatiken entscheidbar und wie hängt die Laufzeit mit der Beschreibung zusammen.

2.8.1 Definition 3.37

Sei D ein DFA, NFA, RE, rechtslineare Grammatik ...

- **Wortproblem:** Gegeben w und D : gilt $w \in L(D)$
- **Leerheitsproblem:** Gegeben D : gilt $\emptyset = L(D)$
- **Endlichkeitsproblem:** Gegeben D : ist $L(D)$ endlich
- **Äquivalenzproblem:** Gegeben D_1, D_2 , gilt $L(D_1) = L(D_2)$

2.9 Automaten und Gleichungssysteme

Wir werden jetzt aus einem Automaten ein Gleichungssystem machen um daraus einen RE zu machen.

2.9.1 Ardens Lemma (Satz 3.47)

Sind A , B und X Sprachen mit $\epsilon \notin A$, so gilt $X = AX \cup B \Rightarrow X = A^*B$

2.9.2 Korollar 3.48

Sind α , β und X reguläre Ausdrücke mit $\epsilon \notin L(\alpha)$, so gilt $X \equiv \alpha X | \beta \Rightarrow X \equiv \alpha^* \beta$

2.9.3 Algorithmus um RE aus Automaten zu machen

1. Wandle FA mit n Zuständen in ein System von n Gleichungen
2. Löse das System durch schrittweise Elimination von Variablen mit Hilfe von Ardens Lemma für REs (Korollar 3.48).
3. Ist k der Startzustand, so beschreibt X_k die vom Automaten akzeptierte Sprache.

2.10 Minimierung endlicher Automaten

TODO MIA

2.11 Äquivalenztest von DFAs

Zwei Automaten sind genau äquivalent wenn:

1. Gegeben DFAs $M1$ und $M2$, bilde disjunkte Vereinigung.
("Male $M1$ und $M2$ nebeneinander.")
2. Berechne Menge der äquivalenten Zustände.
3. $L(M1) = L(M2)$ gdw die beiden Startzustände äquivalent sind

2.12 Äquivalenz von Zuständen

Zwei Zustände sind äquivalent wenn sie selbe Sprache akzeptieren.

2.13 Minimalität des Quotientenautomaten

Die Residualsprache von L bzgl $w \in \Sigma^*$ ist die Menge:

$$L^w := \{z \in \Sigma^* \mid wz \in L\}$$

$L' \subseteq \Sigma^*$ ist Residualsprache von L wenn es w gibt mit $L' = L^w$

2.13.1 Definition 3.55 (Äquivalenz von Wörtern bzgl. L)

(Intuition: Zwei Wörter sind äquivalent wenn sie die gleiche Residualsprache haben.)

zwei Wörter sind äquivalent gdw sie zu den gleichen Zuständen führen

2.13.2 Satz 3.56

Sei M ein DFA ohne unerreichbare Zustände. Der Quotientenautomat M/ \equiv ist ein minimaler DFA für $L(M)$.

2.14 Definition 3.57 (Kanonischer Minimalautomat)

$M_L := (R_L, \Sigma, \delta_L, L, F_L)$ mit $\delta_L(R, a) := R^a$ und $F_L := \{R \in R_L \mid \varepsilon \in R\}$. δ_L ist wohldefiniert und $\hat{\delta}_L(R, w) = R^w$. Jeder Zustand R erkennt die Sprache R und somit $L(M_L) = L$.

2.14.1 Satz 3.58

Jeder minimaler DFA für eine reguläre Sprache L unterscheidet sich vom kanonischen Minimalautomaten M_L nur durch eine

2.15 Satz 3.59

Eine Sprache $L \subseteq \Sigma^*$ ist genau dann regulär, wenn sie endlich viele Residualsprachen hat.

3 Kontextfreie Sprachen

3.0.1 Syntaxbaum:

Die Blätter des Baums, von links nach rechts gelesen,

3.1 Definition 4.2

Eine kontextfreie Grammatik $G = (V, \Sigma, P, S)$ ist ein 4-Tupel:
 V ist eine endlichen Menge, die Nichtterminalzeichen (oder Variablen),
 Σ ist ein Alphabet, die Terminalzeichen, disjunkt von V , $P \subseteq V \times (V \cup \Sigma)^*$
eine endlichen Menge, die Produktionen, und
 $S \in V$ ist das Startsymbol.

3.2 Definition 4.4

Eine kontextfreie Grammatik $G = (V, \Sigma, P, S)$ induziert eine Ableitungsrelation \rightarrow_G auf V^* ortern "über V : \rightarrow_G gdw es eine Regel $A \rightarrow \alpha$ in P gibt, und W orter $1, 2$, so dass $\alpha = 1A2$ und $W = 12$ Beispiel: $a + T + a \rightarrow_G$

3.3 Definition 4.5 (Reflexiv transitive Hülle)

TODO

3.4 Definition 4.6 (Kontextfreie Sprache)

TODO

3.5 Lemma 4.9 (Dekompositionslemma)

$$\begin{aligned} \alpha_1 \alpha_2 &\rightarrow_G^n \beta \\ \Leftrightarrow \\ \exists \beta_1, \beta_2, n_1, n_2. \beta &= \beta_1 \beta_2 \wedge n = n_1 + n_2 \wedge \alpha_i \rightarrow_G^{n_i} \beta_i (i = 1, 2) \end{aligned}$$

3.6 Definition 4.12 (Balancierte Klammerausdrücke)

3.6.1 Präfix

$$u \preceq w \iff \exists v : uv = w$$

3.6.2 Anzahl an Vorkommnissen

$\#_a(w) :=$ Anzahl an a 's in w Seien $A(w) := \#_[(w)$ $B(w) := \#_](w)$ $w \in \{ [,] \}^*$ sei **balanciert** gdw

1. $A(w) = B(w)$
2. $\forall u \preceq w : A(u) \geq B(u)$

3.6.3 4,13

Grammatik $S \rightarrow \epsilon \mid [S] \mid SS$ erzeugt genau die Menge der balancierten Wörter

3.7 4.15 Syntaxbaum

Ein Syntaxbaum für $G = \{V, \Sigma, P, S\}$ so dass gilt:

- jedes Blatt mit einem Zeichen aus $\Sigma \cup \{\epsilon\}$ beschriftet ist
- jeder innere Knoten mit einem $A \in V$ beschriftet ist, falls Nachfolger: als $X_1, \dots, X_n \in V \cup \Sigma \cup \{\epsilon\}$ beschriftet. Dann ist $A \rightarrow X_1, \dots, X_n$ eine Produktion in P
- ein Blatt ϵ der einzige Nachfolger seines Vorgänger ist

3.8 4.17 Äquivalente Bedingungen

Für ein CFG & $w \in \Sigma^*$

- $A \rightarrow_G^* w$
- $w \in L_G(A)$ (gemäß der induktiven Definition)
- Es gibt ein Syntaxbaum mit Wurzel A dessen **Rand** das Wort w ist

3.9 4.18

Ein CFG heißt mehrdeutig \iff es 2 **verschiedene** Syntaxbäume gibt die mit gleichem Rand

Ein CFL L heißt inhärent mehrdeutig \iff jede CFG G mit $L(G) = L$ mehrdeutig ist

4 Chomsky-Normalform

4.0.1 4.21

Ein CFG G ist in Chomsky-Normalform \iff alle Produktionen eine der Formen: $A \rightarrow a$ oder $A \rightarrow BC$ haben

4.0.2 4.22

Jede CFG G hat eine CFG G' in Chomsky-Normalform mit $L(G') = L(G) \setminus \{\epsilon\}$
 Wenn man $\epsilon \in L(G')$ haben will: Füge am Ende $S' \rightarrow S, S \rightarrow \epsilon$ hinzu und setze S' als Startsymbol

4.0.3 Beispiel 4.24 Epsilonproduktion

$S \rightarrow AB, A \rightarrow aAA|B, B \rightarrow bBS|\epsilon$
 $S \rightarrow A, A \rightarrow \epsilon, B \rightarrow bS$
 $S \rightarrow B, A \rightarrow aA, S \rightarrow \epsilon, A \rightarrow a$
 $B \rightarrow bB, B \rightarrow b$

4.0.4 Beispiel mit Farben weil Noah immernoch nicht versteht

Vorgehen:

$S \rightarrow AB|A|B|\epsilon$

$A \rightarrow aAA|B|\epsilon|aA|a$

$B \rightarrow bBS|\epsilon|bS|bB|b$

1) $B \rightarrow \epsilon$ |

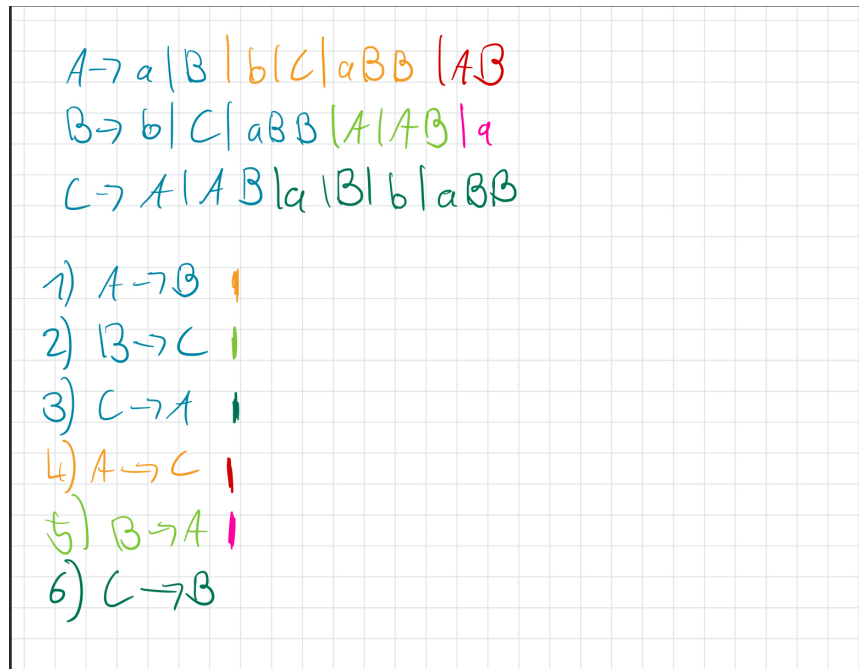
2) $A \rightarrow \epsilon$ |

3) $S \rightarrow \epsilon$ |

4.0.5 4.25

Zu jeder CFG $G = (V, \Sigma, P, S)$ kann man eine CFG G' konstruieren, die keine Kettenproduktionen enthält, so dass gilt
 $L(G') = L(G)$

4.0.6 Beispiel Kettenproduktionen:



4.0.7 Konstruktion einer Chomsky Normalform

1. Füge für jedes $a \in \Sigma$ das in einer rechten Seite der Länge ≥ 2 vorkommt ein X_a ein und füge $X_a \rightarrow a$ hinzu
2. Ersetze jede Produktion der Form $A \rightarrow B_1 B_2 \dots B_k$ ($k \geq 3$) durch
 $A \rightarrow B_1 C_2, C_2 \rightarrow B_2 C_3, \dots, C_{k-1} \rightarrow B_{k-1} B_k$
3. Eliminiere alle ϵ -Produktionen.
4. Eliminiere alle Kettenproduktionen.

4.1 Definition 4.27

Eine CFG ist in Greibach-Normalform (benannt nach Sheila Greibach, UCLA), falls jede Produktion von der Form $A \rightarrow aA_1 \dots A_n$ ist.

4.1.1 Satz 4.28

Zu jeder CFG G gibt es eine CFG G' in Greibach-Normalform mit $L(G') = L(G) \setminus \{\epsilon\}$.

4.2 Pumping Lemma für kontextfreie Sprachen

Für jede kontextfreie Sprache L gibt es ein $n \geq 1$, so dass sich jedes Wort $z \in L$ mit $|z| \geq n$ zerlegen lässt in

$$z = uvwxy,$$

mit

$$vx \neq \epsilon, |vwx| \leq n, \text{ und}$$

$$\forall i \in \mathbb{N}. uv^iwx^iy \in L.$$

4.3 Abschlusseigenschaften kontextfreie Sprachen

TODO