

8a

Linear beschränkte Turingmaschinen (Fortsetzung)

Prof. Dr. Jasmin Blanchette

Lehr- und Forschungseinheit für
Theoretische Informatik und TheorembeweisenStand: 11. Februar 2025
Basierend auf Folien von PD Dr. David Sabel

Wiederholung: Kontextsensitive Grammatiken

- ▶ Die Linke Seite von Produktionen ist $\ell \in (V \cup \Sigma)^+$.
- ▶ Es gilt $|\ell| \leq |r|$ für alle Produktionen $\ell \rightarrow r$.

Definition

Eine **linear beschränkte Turingmaschine** (*linear bounded automaton*, **LBA**) ist ein 8-Tupel $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \langle, \rangle, E)$, wobei:

- ▶ $Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0$ und E sind wie bei nichtdeterministischen Turingmaschinen
- ▶ $\langle, \rangle \in \Sigma$ sind **Start- bzw. Endmarker**
- ▶ δ überschreibt keinen der Marker
- ▶ bei $\langle$ gibt δ nie L aus und bei $\rangle$ gibt δ nie R aus.

Der Satz von Kuroda

Unser Ziel ist es, den Satz von Kuroda zu beweisen:

Theorem (Satz von Kuroda)

Die LBAs akzeptieren genau die kontextsensitiven Sprachen.

Der Satz von Kuroda

Unser Ziel ist es, den Satz von Kuroda zu beweisen:

Theorem (Satz von Kuroda)

Die LBAs akzeptieren genau die kontextsensitiven Sprachen.

Der Beweis erfolgt in zwei Teilen:

- ▶ Jede kontextsensitive Sprache wird von einem LBA erkannt.
- ▶ Die akzeptierte Sprache von LBAs ist kontextsensitiv.

Kuroda-Normalform für Typ 1-Sprachen

Wie bei kontextfreien Sprachen gibt es Normalformen auch für kontextsensitive Sprachen: [die Kuroda-Normalform](#).

Sie ist nach dem Linguisten Sige-Yuki Kuroda benannt.

Kuroda-Normalform für Typ 1-Sprachen

Wie bei kontextfreien Sprachen gibt es Normalformen auch für kontextsensitive Sprachen: [die Kuroda-Normalform](#).

Sie ist nach dem Linguisten Sige-Yuki Kuroda benannt.

Definition

Eine Typ 1-Grammatik $G = (V, \Sigma, P, S)$ ist in [Kuroda-Normalform](#), falls alle Produktionen in P einer der folgenden vier Formen entsprechen:

$$A \rightarrow a \quad A \rightarrow B \quad A \rightarrow BC \quad AB \rightarrow CD$$

wobei $a \in \Sigma$ und $A, B, C, D \in V$.

Kuroda-Normalform für Typ 1-Sprachen

Wie bei kontextfreien Sprachen gibt es Normalformen auch für kontextsensitive Sprachen: [die Kuroda-Normalform](#).

Sie ist nach dem Linguisten Sige-Yuki Kuroda benannt.

Definition

Eine Typ 1-Grammatik $G = (V, \Sigma, P, S)$ ist in [Kuroda-Normalform](#), falls alle Produktionen in P einer der folgenden vier Formen entsprechen:

$$A \rightarrow a \quad A \rightarrow B \quad A \rightarrow BC \quad AB \rightarrow CD$$

wobei $a \in \Sigma$ und $A, B, C, D \in V$.

Die Kuroda-Normalform erweitert kontextfreie Grammatiken um Regeln von der Form $AB \rightarrow CD$.

Herstellen der Kuroda-Normalform

Satz

Sei L eine kontextsensitive Sprache mit $\varepsilon \notin L$.

Dann gibt es eine Grammatik in Kuroda-Normalform, die L erzeugt.

Herstellen der Kuroda-Normalform

Satz

Sei L eine kontextsensitive Sprache mit $\varepsilon \notin L$.

Dann gibt es eine Grammatik in Kuroda-Normalform, die L erzeugt.

Beweis Algorithmus 10 (siehe Skript) bewerkstelligt dies.



Kontextsensitive Sprachen werden von LBAs akzeptiert

Satz

Für jede kontextsensitive Sprache L gibt es einen LBA M mit $L(M) = L$.

Kontextsensitive Sprachen werden von LBAs akzeptiert

Satz

Für jede kontextsensitive Sprache L gibt es einen LBA M mit $L(M) = L$.

Beweis Sei $G = (V, \Sigma, P, S)$ mit $L(G) = L \setminus \{\varepsilon\}$ eine kontextsensitive Grammatik in Kuroda-Normalform.

Kontextsensitive Sprachen werden von LBAs akzeptiert

Satz

Für jede kontextsensitive Sprache L gibt es einen LBA M mit $L(M) = L$.

Beweis Sei $G = (V, \Sigma, P, S)$ mit $L(G) = L \setminus \{\varepsilon\}$ eine kontextsensitive Grammatik in Kuroda-Normalform.

Grundgedanke:

- ▶ Konstruiere den LBA M mit Bandalphabet $\Gamma := \Sigma \cup V \cup \{\langle, \rangle, x\}$.
- ▶ M versucht nichtdeterministisch für $w \in \Sigma^*$ das Startsymbol S der Grammatik rückwärts herzuleiten, durch rückwärts Anwenden der Produktionen $\ell \rightarrow r \in P$, wobei Vorkommen von r durch ℓ ersetzt werden.
- ▶ Akzeptiere, wenn $\langle S \rangle$ (bzw. $\langle \rangle$, falls $S \rightarrow \varepsilon \in P$) auf dem Band vorkommt.
- ▶ Nichtdeterminismus wird verwendet, um zu beschließen, welche Produktion wird rückwärts angewendet und für welches Vorkommen einer rechten Seite.

Beispiel für einen Lauf des konstruierten LBA

Grammatik $G = (\{S, A, B\}, \{a, b\}, P, S)$ in Kuroda-Normalform mit
 $P = \{S \rightarrow AB, S \rightarrow A, A \rightarrow a, B \rightarrow b\}$.

Eingabewort: ab

Beispiel für einen Lauf des konstruierten LBA

Grammatik $G = (\{S, A, B\}, \{a, b\}, P, S)$ in Kuroda-Normalform mit $P = \{S \rightarrow AB, S \rightarrow A, A \rightarrow a, B \rightarrow b\}$.

Eingabewort: ab

Akzeptierender Lauf von M :

1. Am Anfang steht $\langle ab \rangle$ auf dem Band.

Beispiel für einen Lauf des konstruierten LBA

Grammatik $G = (\{S, A, B\}, \{a, b\}, P, S)$ in Kuroda-Normalform mit $P = \{S \rightarrow AB, S \rightarrow A, A \rightarrow a, B \rightarrow b\}$.

Eingabewort: ab

Akzeptierender Lauf von M :

1. Am Anfang steht $\langle ab \rangle$ auf dem Band.
2. b wird durch B ersetzt. Auf dem Band steht nun $\langle aB \rangle$.

Beispiel für einen Lauf des konstruierten LBA

Grammatik $G = (\{S, A, B\}, \{a, b\}, P, S)$ in Kuroda-Normalform mit $P = \{S \rightarrow AB, S \rightarrow A, A \rightarrow a, B \rightarrow b\}$.

Eingabewort: ab

Akzeptierender Lauf von M :

1. Am Anfang steht $\langle ab \rangle$ auf dem Band.
2. b wird durch B ersetzt. Auf dem Band steht nun $\langle aB \rangle$.
3. a wird durch A ersetzt. Auf dem Band steht nun $\langle AB \rangle$.

Beispiel für einen Lauf des konstruierten LBA

Grammatik $G = (\{S, A, B\}, \{a, b\}, P, S)$ in Kuroda-Normalform mit $P = \{S \rightarrow AB, S \rightarrow A, A \rightarrow a, B \rightarrow b\}$.

Eingabewort: ab

Akzeptierender Lauf von M :

1. Am Anfang steht $\langle ab \rangle$ auf dem Band.
2. b wird durch B ersetzt. Auf dem Band steht nun $\langle aB \rangle$.
3. a wird durch A ersetzt. Auf dem Band steht nun $\langle AB \rangle$.
4. AB wird durch xS ersetzt. Auf dem Band steht nun $\langle xS \rangle$.

Beispiel für einen Lauf des konstruierten LBA

Grammatik $G = (\{S, A, B\}, \{a, b\}, P, S)$ in Kuroda-Normalform mit $P = \{S \rightarrow AB, S \rightarrow A, A \rightarrow a, B \rightarrow b\}$.

Eingabewort: ab

Akzeptierender Lauf von M :

1. Am Anfang steht $\langle ab \rangle$ auf dem Band.
2. b wird durch B ersetzt. Auf dem Band steht nun $\langle aB \rangle$.
3. a wird durch A ersetzt. Auf dem Band steht nun $\langle AB \rangle$.
4. AB wird durch xS ersetzt. Auf dem Band steht nun $\langle xS \rangle$.
5. Das x wird durch $\langle$ ersetzt. Auf dem Band steht $\langle \langle S \rangle$.

Beispiel für einen Lauf des konstruierten LBA

Grammatik $G = (\{S, A, B\}, \{a, b\}, P, S)$ in Kuroda-Normalform mit $P = \{S \rightarrow AB, S \rightarrow A, A \rightarrow a, B \rightarrow b\}$.

Eingabewort: ab

Akzeptierender Lauf von M :

1. Am Anfang steht $\langle ab \rangle$ auf dem Band.
2. b wird durch B ersetzt. Auf dem Band steht nun $\langle aB \rangle$.
3. a wird durch A ersetzt. Auf dem Band steht nun $\langle AB \rangle$.
4. AB wird durch xS ersetzt. Auf dem Band steht nun $\langle xS \rangle$.
5. Das x wird durch $\langle$ ersetzt. Auf dem Band steht $\langle \langle S \rangle$.
6. M akzeptiert.

Kontextsensitive Sprachen werden von LBAs akzeptiert

Beweis (Fortsetzung) Suche nach einer rechter Seite r :

1. Beginne links an der Eingabe und laufe diese durch.
2. Speichere das Symbol links vom Schreib-Lesekopf im aktuellen Zustand.
3. Stelle mit dem aktuellen Symbol fest, ob es passende Produktion gibt.
(Da rechte Seiten von Produktionen in Kuroda-Normalform aus maximal zwei Zeichen bestehen, genügt dies.)

Kontextsensitive Sprachen werden von LBAs akzeptiert

Beweis (Fortsetzung) Ersetzung von r durch ℓ :

1. Für $A \rightarrow a$ und $A \rightarrow B$ wird das aktuelle Symbol durch A ersetzt, anschließend wird der nächste Schritt gestartet.
2. Für $AB \rightarrow CD$, wird B geschrieben und der Kopf nach links wechseln, dann A geschrieben und der nächste Schritt gestartet.
3. Für $A \rightarrow BC$ schreibe A und wechsele nach links, schreibe x , fahre ganz nach links und starte die Prozedur zum Verschieben der Zeichen nach rechts, solange bis x überschrieben ist.

Kontextsensitive Sprachen werden von LBAs akzeptiert

Beweis (Fortsetzung) Verschieben nach rechts:

1. Speichere das linkeste Symbol im Zustand und schreibe $\langle$.
2. Laufe nach rechts. Dabei wird das aktuelle Symbol mit dem gespeicherten vertauscht.
3. Beende Vertauschen, nachdem x mit einem anderen Symbol vertauscht wird. $\square$

Bemerkungen und Typ 0-Grammatiken

- Der Grundgedanke der Konstruktion funktioniert auch für Typ 1-Grammatiken nicht in Kuroda-Normalform, ist aber komplizierter.

Bemerkungen und Typ 0-Grammatiken

- ▶ Der Grundgedanke der Konstruktion funktioniert auch für Typ 1-Grammatiken nicht in Kuroda-Normalform, ist aber komplizierter.
- ▶ Der Grundgedanke der Konstruktion funktioniert auch für Typ 0-Grammatiken: Der Platz ist allerdings dann unbeschränkt, und eine NTM wird benötigt.

Bemerkungen und Typ 0-Grammatiken

- ▶ Der Grundgedanke der Konstruktion funktioniert auch für Typ 1-Grammatiken nicht in Kuroda-Normalform, ist aber komplizierter.
- ▶ Der Grundgedanke der Konstruktion funktioniert auch für Typ 0-Grammatiken: Der Platz ist allerdings dann unbeschränkt, und eine NTM wird benötigt.

Satz

Für jede Typ 0-Sprache L gibt es eine nichtdeterministische Turingmaschine M mit $L(M) = L$.

Beweis Der Beweis des letzten Satzes kann angepasst werden, damit er eine NTM konstruiert, die eine beliebige Typ 0-Grammatik simuliert. $\square$

Die akzeptierte Sprache von LBAs ist kontextsensitiv

Satz

Sei $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \langle, \rangle, E)$ ein LBA. Dann ist $L(M)$ kontextsensitiv.

Die akzeptierte Sprache von LBAs ist kontextsensitiv

Satz

Sei $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \langle, \rangle, E)$ ein LBA. Dann ist $L(M)$ kontextsensitiv.

Beweis Konstruiere eine Typ 1-Grammatik G mit $L(G) = L(M)$.

Die akzeptierte Sprache von LBAs ist kontextsensitiv

Satz

Sei $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \langle, \rangle, E)$ ein LBA. Dann ist $L(M)$ kontextsensitiv.

Beweis Konstruiere eine Typ 1-Grammatik G mit $L(G) = L(M)$.

Grundgedanke:

1. Erzeuge ein beliebiges Wort w und die Startkonfiguration von M für w .
2. Simuliere M zum Prüfen, ob $w \in L(M)$.
3. Wenn M akzeptiert, erzeuge w endgültig.

Die akzeptierte Sprache von LBAs ist kontextsensitiv

Satz

Sei $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \langle, \rangle, E)$ ein LBA. Dann ist $L(M)$ kontextsensitiv.

Beweis Konstruiere eine Typ 1-Grammatik G mit $L(G) = L(M)$.

Grundgedanke:

1. Erzeuge ein beliebiges Wort w und die Startkonfiguration von M für w .
2. Simuliere M zum Prüfen, ob $w \in L(M)$.
3. Wenn M akzeptiert, erzeuge w endgültig.

Die Variablen V von G sind S , A und Tupeln von der Form $\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$, wobei $u \in \Sigma$ und $v \in (\Gamma \cup Z)^+$.

Die oberen Komponenten einer Tupelfolge $\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} u_n \\ v_n \end{bmatrix}$ ergeben ein Wort w .
Die unteren Komponenten ergeben eine LBA-Konfiguration.

Beispiel für eine Ableitung der konstruierten Grammatik

LBA $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \langle, \rangle, E)$ mit

$Z = \{z_0, z_1, z_2\}$, $\Sigma = \{a, \langle, \rangle\}$, $\Gamma = \Sigma \cup \{x\}$, $E = \{z_2\}$ und

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = (z_1, x, R) & \delta(z_0, \langle) = (z_0, \langle, R) & \delta(z_0, \rangle) = (z_0, \rangle, L) \\ \delta(z_1, a) = (z_2, x, R) & \delta(z_1, \langle) = (z_1, \langle, R) & \delta(z_1, \rangle) = (z_1, \rangle, L) \end{array}$$

Beispiel für eine Ableitung der konstruierten Grammatik

LBA $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \langle, \rangle, E)$ mit

$Z = \{z_0, z_1, z_2\}$, $\Sigma = \{a, \langle, \rangle\}$, $\Gamma = \Sigma \cup \{x\}$, $E = \{z_2\}$ und

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = (z_1, x, R) & \delta(z_0, \langle) = (z_0, \langle, R) & \delta(z_0, \rangle) = (z_0, \rangle, L) \\ \delta(z_1, a) = (z_2, x, R) & \delta(z_1, \langle) = (z_1, \langle, R) & \delta(z_1, \rangle) = (z_1, \rangle, L) \end{array}$$

Akzeptierender Lauf auf aa :

$z_0 \langle aa \rangle$

Beispiel für eine Ableitung der konstruierten Grammatik

LBA $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \langle, \rangle, E)$ mit

$Z = \{z_0, z_1, z_2\}$, $\Sigma = \{a, \langle, \rangle\}$, $\Gamma = \Sigma \cup \{x\}$, $E = \{z_2\}$ und

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = (z_1, x, R) & \delta(z_0, \langle) = (z_0, \langle, R) & \delta(z_0, \rangle) = (z_0, \rangle, L) \\ \delta(z_1, a) = (z_2, x, R) & \delta(z_1, \langle) = (z_1, \langle, R) & \delta(z_1, \rangle) = (z_1, \rangle, L) \end{array}$$

Akzeptierender Lauf auf aa :

$z_0 \langle aa \rangle$

Beispiel für eine Ableitung der konstruierten Grammatik

LBA $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \langle, \rangle, E)$ mit

$Z = \{z_0, z_1, z_2\}$, $\Sigma = \{a, \langle, \rangle\}$, $\Gamma = \Sigma \cup \{x\}$, $E = \{z_2\}$ und

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = (z_1, x, R) & \delta(z_0, \langle) = (z_0, \langle, R) & \delta(z_0, \rangle) = (z_0, \rangle, L) \\ \delta(z_1, a) = (z_2, x, R) & \delta(z_1, \langle) = (z_1, \langle, R) & \delta(z_1, \rangle) = (z_1, \rangle, L) \end{array}$$

Akzeptierender Lauf auf aa :

$$z_0 \langle aa \rangle \vdash \langle z_0 aa \rangle$$

Beispiel für eine Ableitung der konstruierten Grammatik

LBA $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \langle, \rangle, E)$ mit

$Z = \{z_0, z_1, z_2\}$, $\Sigma = \{a, \langle, \rangle\}$, $\Gamma = \Sigma \cup \{x\}$, $E = \{z_2\}$ und

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = (z_1, x, R) & \delta(z_0, \langle) = (z_0, \langle, R) & \delta(z_0, \rangle) = (z_0, \rangle, L) \\ \delta(z_1, a) = (z_2, x, R) & \delta(z_1, \langle) = (z_1, \langle, R) & \delta(z_1, \rangle) = (z_1, \rangle, L) \end{array}$$

Akzeptierender Lauf auf aa :

$$z_0 \langle aa \rangle \vdash \langle z_0 aa \rangle$$

Beispiel für eine Ableitung der konstruierten Grammatik

LBA $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \langle, \rangle, E)$ mit

$Z = \{z_0, z_1, z_2\}$, $\Sigma = \{a, \langle, \rangle\}$, $\Gamma = \Sigma \cup \{x\}$, $E = \{z_2\}$ und

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = (z_1, x, R) & \delta(z_0, \langle) = (z_0, \langle, R) & \delta(z_0, \rangle) = (z_0, \rangle, L) \\ \delta(z_1, a) = (z_2, x, R) & \delta(z_1, \langle) = (z_1, \langle, R) & \delta(z_1, \rangle) = (z_1, \rangle, L) \end{array}$$

Akzeptierender Lauf auf aa :

$$z_0 \langle aa \rangle \vdash \langle z_0 aa \rangle \vdash \langle x z_1 a \rangle$$

Beispiel für eine Ableitung der konstruierten Grammatik

LBA $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \langle, \rangle, E)$ mit

$Z = \{z_0, z_1, z_2\}$, $\Sigma = \{a, \langle, \rangle\}$, $\Gamma = \Sigma \cup \{x\}$, $E = \{z_2\}$ und

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = (z_1, x, R) & \delta(z_0, \langle) = (z_0, \langle, R) & \delta(z_0, \rangle) = (z_0, \rangle, L) \\ \delta(z_1, a) = (z_2, x, R) & \delta(z_1, \langle) = (z_1, \langle, R) & \delta(z_1, \rangle) = (z_1, \rangle, L) \end{array}$$

Akzeptierender Lauf auf aa :

$$z_0 \langle aa \rangle \vdash \langle z_0 aa \rangle \vdash \langle x z_1 a \rangle$$

Beispiel für eine Ableitung der konstruierten Grammatik

LBA $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \langle, \rangle, E)$ mit

$Z = \{z_0, z_1, z_2\}$, $\Sigma = \{a, \langle, \rangle\}$, $\Gamma = \Sigma \cup \{x\}$, $E = \{z_2\}$ und

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = (z_1, x, R) & \delta(z_0, \langle) = (z_0, \langle, R) & \delta(z_0, \rangle) = (z_0, \rangle, L) \\ \delta(z_1, a) = (z_2, x, R) & \delta(z_1, \langle) = (z_1, \langle, R) & \delta(z_1, \rangle) = (z_1, \rangle, L) \end{array}$$

Akzeptierender Lauf auf aa :

$$z_0 \langle aa \rangle \vdash \langle z_0 aa \rangle \vdash \langle x z_1 a \rangle \vdash \langle x x z_2 \rangle$$

Beispiel für eine Ableitung der konstruierten Grammatik

LBA $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \langle, \rangle, E)$ mit

$Z = \{z_0, z_1, z_2\}$, $\Sigma = \{a, \langle, \rangle\}$, $\Gamma = \Sigma \cup \{x\}$, $E = \{z_2\}$ und

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = (z_1, x, R) & \delta(z_0, \langle) = (z_0, \langle, R) & \delta(z_0, \rangle) = (z_0, \rangle, L) \\ \delta(z_1, a) = (z_2, x, R) & \delta(z_1, \langle) = (z_1, \langle, R) & \delta(z_1, \rangle) = (z_1, \rangle, L) \end{array}$$

Akzeptierender Lauf auf aa :

$$z_0 \langle aa \rangle \vdash \langle z_0 aa \rangle \vdash \langle xz_1 a \rangle \vdash \langle xxz_2 \rangle$$

Ableitung von aa :

S

Beispiel für eine Ableitung der konstruierten Grammatik

LBA $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \langle, \rangle, E)$ mit

$Z = \{z_0, z_1, z_2\}$, $\Sigma = \{a, \langle, \rangle\}$, $\Gamma = \Sigma \cup \{x\}$, $E = \{z_2\}$ und

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = (z_1, x, R) & \delta(z_0, \langle) = (z_0, \langle, R) & \delta(z_0, \rangle) = (z_0, \rangle, L) \\ \delta(z_1, a) = (z_2, x, R) & \delta(z_1, \langle) = (z_1, \langle, R) & \delta(z_1, \rangle) = (z_1, \rangle, L) \end{array}$$

Akzeptierender Lauf auf aa :

$$z_0 \langle aa \rangle \vdash \langle z_0 aa \rangle \vdash \langle xz_1 a \rangle \vdash \langle xxz_2 \rangle$$

Ableitung von aa :

$$S \Rightarrow \left[\begin{smallmatrix} a \\ z_0 \langle a \end{smallmatrix} \right] A$$

Beispiel für eine Ableitung der konstruierten Grammatik

LBA $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \langle, \rangle, E)$ mit

$Z = \{z_0, z_1, z_2\}$, $\Sigma = \{a, \langle, \rangle\}$, $\Gamma = \Sigma \cup \{x\}$, $E = \{z_2\}$ und

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = (z_1, x, R) & \delta(z_0, \langle) = (z_0, \langle, R) & \delta(z_0, \rangle) = (z_0, \rangle, L) \\ \delta(z_1, a) = (z_2, x, R) & \delta(z_1, \langle) = (z_1, \langle, R) & \delta(z_1, \rangle) = (z_1, \rangle, L) \end{array}$$

Akzeptierender Lauf auf aa :

$$z_0 \langle aa \rangle \vdash \langle z_0 aa \rangle \vdash \langle x z_1 a \rangle \vdash \langle x x z_2 \rangle$$

Ableitung von aa :

$$S \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ z_0 \langle a \rangle \end{bmatrix} A \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ z_0 \langle a \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ a \rangle \end{bmatrix}$$

Beispiel für eine Ableitung der konstruierten Grammatik

LBA $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \langle, \rangle, E)$ mit
 $Z = \{z_0, z_1, z_2\}$, $\Sigma = \{a, \langle, \rangle\}$, $\Gamma = \Sigma \cup \{x\}$, $E = \{z_2\}$ und

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = (z_1, x, R) & \delta(z_0, \langle) = (z_0, \langle, R) & \delta(z_0, \rangle) = (z_0, \rangle, L) \\ \delta(z_1, a) = (z_2, x, R) & \delta(z_1, \langle) = (z_1, \langle, R) & \delta(z_1, \rangle) = (z_1, \rangle, L) \end{array}$$

Akzeptierender Lauf auf aa :

$$z_0 \langle aa \rangle \vdash \langle z_0 aa \rangle \vdash \langle x z_1 a \rangle \vdash \langle x x z_2 \rangle$$

Ableitung von aa :

$$S \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ z_0 \langle a \rangle \end{bmatrix} A \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ z_0 \langle a \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ a \rangle \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ \langle z_0 a \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ a \rangle \end{bmatrix}$$

Beispiel für eine Ableitung der konstruierten Grammatik

LBA $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \langle, \rangle, E)$ mit

$Z = \{z_0, z_1, z_2\}$, $\Sigma = \{a, \langle, \rangle\}$, $\Gamma = \Sigma \cup \{x\}$, $E = \{z_2\}$ und

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = (z_1, x, R) & \delta(z_0, \langle) = (z_0, \langle, R) & \delta(z_0, \rangle) = (z_0, \rangle, L) \\ \delta(z_1, a) = (z_2, x, R) & \delta(z_1, \langle) = (z_1, \langle, R) & \delta(z_1, \rangle) = (z_1, \rangle, L) \end{array}$$

Akzeptierender Lauf auf aa :

$$z_0 \langle aa \rangle \vdash \langle z_0 aa \rangle \vdash \langle x z_1 a \rangle \vdash \langle x x z_2 \rangle$$

Ableitung von aa :

$$S \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ z_0 \langle a \rangle \end{bmatrix} A \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ z_0 \langle a \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ a \rangle \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ \langle z_0 a \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ a \rangle \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ \langle x \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ z_1 a \rangle \end{bmatrix}$$

Beispiel für eine Ableitung der konstruierten Grammatik

LBA $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \langle, \rangle, E)$ mit

$Z = \{z_0, z_1, z_2\}$, $\Sigma = \{a, \langle, \rangle\}$, $\Gamma = \Sigma \cup \{x\}$, $E = \{z_2\}$ und

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = (z_1, x, R) & \delta(z_0, \langle) = (z_0, \langle, R) & \delta(z_0, \rangle) = (z_0, \rangle, L) \\ \delta(z_1, a) = (z_2, x, R) & \delta(z_1, \langle) = (z_1, \langle, R) & \delta(z_1, \rangle) = (z_1, \rangle, L) \end{array}$$

Akzeptierender Lauf auf aa :

$$z_0 \langle aa \rangle \vdash \langle z_0 aa \rangle \vdash \langle x z_1 a \rangle \vdash \langle x x z_2 \rangle$$

Ableitung von aa :

$$S \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ z_0 \langle a \rangle \end{bmatrix} A \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ z_0 \langle a \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ a \rangle \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ \langle z_0 a \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ a \rangle \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ \langle x \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ z_1 a \rangle \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ \langle x \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ x z_2 \rangle \end{bmatrix}$$

Beispiel für eine Ableitung der konstruierten Grammatik

LBA $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \langle, \rangle, E)$ mit

$Z = \{z_0, z_1, z_2\}$, $\Sigma = \{a, \langle, \rangle\}$, $\Gamma = \Sigma \cup \{x\}$, $E = \{z_2\}$ und

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = (z_1, x, R) & \delta(z_0, \langle) = (z_0, \langle, R) & \delta(z_0, \rangle) = (z_0, \rangle, L) \\ \delta(z_1, a) = (z_2, x, R) & \delta(z_1, \langle) = (z_1, \langle, R) & \delta(z_1, \rangle) = (z_1, \rangle, L) \end{array}$$

Akzeptierender Lauf auf aa :

$$z_0 \langle aa \rangle \vdash \langle z_0 aa \rangle \vdash \langle x z_1 a \rangle \vdash \langle x x z_2 \rangle$$

Ableitung von aa :

$$S \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ z_0 \langle a \rangle \end{bmatrix} A \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ z_0 \langle a \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ a \rangle \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ \langle z_0 a \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ a \rangle \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ \langle x \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ z_1 a \rangle \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ \langle x \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ x z_2 \rangle \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ \langle x \rangle \end{bmatrix} a$$

Beispiel für eine Ableitung der konstruierten Grammatik

LBA $M = (Z, \Sigma, \Gamma, \delta, z_0, \langle, \rangle, E)$ mit
 $Z = \{z_0, z_1, z_2\}$, $\Sigma = \{a, \langle, \rangle\}$, $\Gamma = \Sigma \cup \{x\}$, $E = \{z_2\}$ und

$$\begin{array}{lll} \delta(z_0, a) = (z_1, x, R) & \delta(z_0, \langle) = (z_0, \langle, R) & \delta(z_0, \rangle) = (z_0, \rangle, L) \\ \delta(z_1, a) = (z_2, x, R) & \delta(z_1, \langle) = (z_1, \langle, R) & \delta(z_1, \rangle) = (z_1, \rangle, L) \end{array}$$

Akzeptierender Lauf auf aa :

$$z_0 \langle aa \rangle \vdash \langle z_0 aa \rangle \vdash \langle x z_1 a \rangle \vdash \langle x x z_2 \rangle$$

Ableitung von aa :

$$S \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ z_0 \langle a \rangle \end{bmatrix} A \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ z_0 \langle a \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ a \rangle \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ \langle z_0 a \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ a \rangle \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ \langle x \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ z_1 a \rangle \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ \langle x \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ x z_2 \rangle \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} a \\ \langle x \rangle \end{bmatrix} a \Rightarrow aa$$

Die akzeptierte Sprache von LBAs ist kontextsensitiv

Beweis (Fortsetzung) Konstruiere $G = (V, \Sigma - \{\langle, \rangle\}, P_0 \cup P_1 \cup P_2 \cup P_3, S)$.

1. Erzeuge ein beliebiges Wort $w \in \Sigma^*$ und die Startkonfiguration von M für w :

► Regeln zur Erzeugung von $w \in \Sigma^*$ und Startkonfiguration zw:

$$P_0 := \{S \rightarrow \begin{bmatrix} a \\ z_0 \langle a \rangle \end{bmatrix} A \mid a \in \Sigma\} \cup \{S \rightarrow \begin{bmatrix} a \\ z_0 \langle a \rangle \end{bmatrix} \mid a \in \Sigma\} \\ \cup \{A \rightarrow \begin{bmatrix} a \\ a \end{bmatrix} A \mid a \in \Sigma\} \cup \{A \rightarrow \begin{bmatrix} a \\ a \end{bmatrix} \mid a \in \Sigma\}$$

Die akzeptierte Sprache von LBAs ist kontextsensitiv

Beweis (Fortsetzung) Konstruiere $G = (V, \Sigma - \{\langle, \rangle\}, P_0 \cup P_1 \cup P_2 \cup P_3, S)$.

1. Erzeuge ein beliebiges Wort $w \in \Sigma^*$ und die Startkonfiguration von M für w :

► Regeln zur Erzeugung von $w \in \Sigma^*$ und Startkonfiguration zw:

$$P_0 := \{S \rightarrow \begin{bmatrix} a \\ z_0 \langle a \end{bmatrix} A \mid a \in \Sigma\} \cup \{S \rightarrow \begin{bmatrix} a \\ z_0 \langle a \end{bmatrix} \mid a \in \Sigma\} \\ \cup \{A \rightarrow \begin{bmatrix} a \\ a \end{bmatrix} A \mid a \in \Sigma\} \cup \{A \rightarrow \begin{bmatrix} a \\ a \end{bmatrix} \mid a \in \Sigma\}$$

► Für $a_1 \cdots a_n \in \Sigma^*$ mit $n \geq 1$ gilt

$$S \Rightarrow^* \begin{bmatrix} a_1 \\ z_0 \langle a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_2 \\ a_2 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} a_n \\ a_n \end{bmatrix}$$

Die akzeptierte Sprache von LBAs ist kontextsensitiv

Beweis (Fortsetzung) Konstruiere $G = (V, \Sigma - \{\langle, \rangle\}, P_0 \cup P_1 \cup P_2 \cup P_3, S)$.

1. Erzeuge ein beliebiges Wort $w \in \Sigma^*$ und die Startkonfiguration von M für w :

► Regeln zur Erzeugung von $w \in \Sigma^*$ und Startkonfiguration zw:

$$P_0 := \{S \rightarrow \begin{bmatrix} a \\ z_0 \langle a \rangle \end{bmatrix} A \mid a \in \Sigma\} \cup \{S \rightarrow \begin{bmatrix} a \\ z_0 \langle a \rangle \end{bmatrix} \mid a \in \Sigma\} \\ \cup \{A \rightarrow \begin{bmatrix} a \\ a \end{bmatrix} A \mid a \in \Sigma\} \cup \{A \rightarrow \begin{bmatrix} a \\ a \end{bmatrix} \mid a \in \Sigma\}$$

► Für $a_1 \cdots a_n \in \Sigma^*$ mit $n \geq 1$ gilt

$$S \Rightarrow^* \begin{bmatrix} a_1 \\ z_0 \langle a_1 \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_2 \\ a_2 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} a_n \\ a_n \end{bmatrix}$$

► ε kann dadurch nicht erzeugt werden, daher:

$$P_1 := \{S \rightarrow \varepsilon \mid \varepsilon \in L(M)\}$$

Die akzeptierte Sprache von LBAs ist kontextsensitiv

Beweis (Fortsetzung)

2. Simuliere M zum Prüfen, ob $w \in L(M)$.

- Regelmenge P_2 simuliert M auf den unteren Komponenten:

$$\begin{aligned} P_2 := & \{ \begin{bmatrix} d \\ z a \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} d \\ z' b \end{bmatrix} \mid (z', b, N) \in \delta(z, a), d \in \Sigma \} \\ & \cup \{ \begin{bmatrix} d \\ c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ z a \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} d \\ z' c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ b \end{bmatrix} \mid (z', b, L) \in \delta(z, a), c \in \Gamma, d, e \in \Sigma \} \\ & \cup \{ \begin{bmatrix} d \\ z a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ c \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} d \\ b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ z' c \end{bmatrix} \mid (z', b, R) \in \delta(z, a), c \in \Gamma, d, e \in \Sigma \} \\ & \cup \dots \end{aligned}$$

- Weitere Regeln sind notwendig, um mit $\langle$ und $\rangle$ richtig umzugehen.

Die akzeptierte Sprache von LBAs ist kontextsensitiv

Beweis (Fortsetzung)

3. Wenn M akzeptiert, erzeuge w endgültig.

- ▶ Nach Akzeptieren durch M erstellt Regelmenge P_3 aus Tupelfolgen das Wort $a_1 \cdots a_n$.

$$\begin{aligned} P_3 := & \{ \begin{bmatrix} b \\ z a \end{bmatrix} \rightarrow b \mid z \in E, a \in \Gamma, b \in \Sigma \} \\ & \cup \{ \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} \rightarrow b \mid a \in \Gamma, b \in \Sigma \} \\ & \cup \dots \end{aligned}$$

- ▶ Weitere Regeln sind notwendig um mit $\langle$ und $\rangle$ richtig umzugehen.

Die akzeptierte Sprache von LBAs ist kontextsensitiv

Beweis (Fortsetzung)

3. Wenn M akzeptiert, erzeuge w endgültig.

- ▶ Nach Akzeptieren durch M erstellt Regelmenge P_3 aus Tupelfolgen das Wort $a_1 \cdots a_n$.

$$P_3 := \left\{ \begin{bmatrix} b \\ z a \end{bmatrix} \rightarrow b \mid z \in E, a \in \Gamma, b \in \Sigma \right\} \\ \cup \left\{ \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} \rightarrow b \mid a \in \Gamma, b \in \Sigma \right\} \\ \cup \dots$$

- ▶ Weitere Regeln sind notwendig um mit $\langle$ und $\rangle$ richtig umzugehen.
- ▶ Wenn $z \in E$, gilt

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} a_m \\ b_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{m+1} \\ z b_{m+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{m+2} \\ b_{m+2} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} a_n \\ b_n \end{bmatrix} \Rightarrow^* a_1 \cdots a_n$$

Die akzeptierte Sprache von LBAs ist kontextsensitiv

Beweis (Fortsetzung)

3. Wenn M akzeptiert, erzeuge w endgültig.

- ▶ Nach Akzeptieren durch M erstellt Regelmenge P_3 aus Tupelfolgen das Wort $a_1 \cdots a_n$.

$$P_3 := \left\{ \begin{bmatrix} b \\ z a \end{bmatrix} \rightarrow b \mid z \in E, a \in \Gamma, b \in \Sigma \right\} \\ \cup \left\{ \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} \rightarrow b \mid a \in \Gamma, b \in \Sigma \right\} \\ \cup \dots$$

- ▶ Weitere Regeln sind notwendig um mit $\langle$ und $\rangle$ richtig umzugehen.
- ▶ Wenn $z \in E$, gilt

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} a_m \\ b_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{m+1} \\ z b_{m+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{m+2} \\ b_{m+2} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} a_n \\ b_n \end{bmatrix} \Rightarrow^* a_1 \cdots a_n$$

Dann gilt für alle $w \in (\Sigma - \{\langle, \rangle\})^*$: $S \Rightarrow_G^* w$ g.d.w. $w \in L(M)$.

Die akzeptierte Sprache von LBAs ist kontextsensitiv

Beweis (Fortsetzung)

3. Wenn M akzeptiert, erzeuge w endgültig.

- ▶ Nach Akzeptieren durch M erstellt Regelmenge P_3 aus Tupelfolgen das Wort $a_1 \cdots a_n$.

$$P_3 := \{ \begin{bmatrix} b \\ z a \end{bmatrix} \rightarrow b \mid z \in E, a \in \Gamma, b \in \Sigma \} \\ \cup \{ \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} \rightarrow b \mid a \in \Gamma, b \in \Sigma \} \\ \cup \dots$$

- ▶ Weitere Regeln sind notwendig um mit $\langle$ und $\rangle$ richtig umzugehen.
- ▶ Wenn $z \in E$, gilt

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} a_m \\ b_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{m+1} \\ z b_{m+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{m+2} \\ b_{m+2} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} a_n \\ b_n \end{bmatrix} \Rightarrow^* a_1 \cdots a_n$$

Dann gilt für alle $w \in (\Sigma - \{\langle, \rangle\})^*$: $S \Rightarrow_G^* w$ g.d.w. $w \in L(M)$.

Außerdem gilt, dass G kontextsensitiv ist, da es keine verkürzenden Regeln gibt (außer $S \rightarrow \varepsilon$, falls vorhanden).



Anpassung des Beweises für Typ 0-Sprachen

Die Konstruktion der Typ 1-Grammatik aus einem LBA kann für beliebige NTMs angepasst werden.

Grundgedanke:

- ▶ Zusätzliche Tupel $\begin{bmatrix} \$ \\ v \end{bmatrix}$ für \$ ein neues Symbol.
- ▶ Konfiguration, die länger als das Eingabewort sind, werden so dargestellt:

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ c_1 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} a_n \\ c_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \$ \\ c_{n+1} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \$ \\ z_j c_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \$ \\ c_r \end{bmatrix}$$

- ▶ Regelmenge P_3 enthält Regeln $\begin{bmatrix} \$ \\ c_j \end{bmatrix} \rightarrow \varepsilon$, die nicht vom Typ 1 sind.

Anpassung des Beweises für Typ 0-Sprachen

Die Konstruktion der Typ 1-Grammatik aus einem LBA kann für beliebige NTMs angepasst werden.

Grundgedanke:

- ▶ Zusätzliche Tupel $\begin{bmatrix} \$ \\ v \end{bmatrix}$ für $\$$ ein neues Symbol.
- ▶ Konfiguration, die länger als das Eingabewort sind, werden so dargestellt:

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ c_1 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} a_n \\ c_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \$ \\ c_{n+1} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \$ \\ z_j c_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \$ \\ c_r \end{bmatrix}$$

- ▶ Regelmenge P_3 enthält Regeln $\begin{bmatrix} \$ \\ c_j \end{bmatrix} \rightarrow \varepsilon$, die nicht vom Typ 1 sind.

Daher:

Satz

Die nichtdeterministischen Turingmaschinen akzeptierten genau die Typ 0-Sprachen.

1. LBA-Problem

Erkennen deterministische LBAs dieselben Sprachen wie nichtdeterministische LBAs?

Das Problem ist bis heute ungeklärt.

1. LBA-Problem

Erkennen deterministische LBAs dieselben Sprachen wie nichtdeterministische LBAs?

Das Problem ist bis heute ungeklärt.

2. LBA-Problem

Sind die kontextsensitiven Sprachen abgeschlossen unter Komplementbildung?

Das Problem wurde 1964 formuliert von Kuroda, 1987 gelöst von sowohl Neil Immerman als auch Róbert Szelepcsényi.

1. LBA-Problem

Erkennen deterministische LBAs dieselben Sprachen wie nichtdeterministische LBAs?

Das Problem ist bis heute ungeklärt.

2. LBA-Problem

Sind die kontextsensitiven Sprachen abgeschlossen unter Komplementbildung?

Das Problem wurde 1964 formuliert von Kuroda, 1987 gelöst von sowohl Neil Immerman als auch Róbert Szelepcsényi.

Überraschenderweise **positiv**:

Theorem (Satz von Immerman und Szelepcsényi)

Die kontextsensitiven Sprachen sind abgeschlossen unter Komplementbildung.

2. LBA-Problem

Theorem (Satz von Immerman und Szelepcsényi)

Die kontextsensitiven Sprachen sind abgeschlossen unter Komplementbildung.

Naiver Beweis:

- ▶ Sei $G = (V, \Sigma, P, S)$ eine Typ 1-Grammatik mit $L(G) = L$.
- ▶ Konstruiere den LBA M für $\bar{L} = \Sigma^* \setminus L$.
 1. Sei $w \in \Sigma^*$.
 2. Prüfe, ob $S \Rightarrow_G^* w$ gilt (vgl. Beweis des Satzes von Kuroda).
 3. Wenn ja, dann verwirf.
 4. Wenn nein, dann akzeptiere.

2. LBA-Problem

Theorem (Satz von Immerman und Szelepcsényi)

Die kontextsensitiven Sprachen sind abgeschlossen unter Komplementbildung.

Naiver Beweis:

- ▶ Sei $G = (V, \Sigma, P, S)$ eine Typ 1-Grammatik mit $L(G) = L$.
- ▶ Konstruiere den LBA M für $\bar{L} = \Sigma^* \setminus L$.
 1. Sei $w \in \Sigma^*$.
 2. Prüfe, ob $S \Rightarrow_G^* w$ gilt (vgl. Beweis des Satzes von Kuroda).
 3. Wenn ja, dann verwirf.
 4. Wenn nein, dann akzeptiere.

Problem: Die Berechnung von $S \Rightarrow_G^* w$ mit einem LBA ist **nichtdeterministisch**.
Der Test $S \Rightarrow_G^* w$ kann **fehlschlagen**, auch wenn $S \Rightarrow_G^* w$ gilt.

2. LBA-Problem

Theorem (Satz von Immerman und Szelepcsényi)

Die kontextsensitiven Sprachen sind abgeschlossen unter Komplementbildung.

Naiver Beweis:

- ▶ Sei $G = (V, \Sigma, P, S)$ eine Typ 1-Grammatik mit $L(G) = L$.
- ▶ Konstruiere den LBA M für $\bar{L} = \Sigma^* \setminus L$.
 1. Sei $w \in \Sigma^*$.
 2. Prüfe, ob $S \Rightarrow_G^* w$ gilt (vgl. Beweis des Satzes von Kuroda).
 3. Wenn ja, dann verwirf.
 4. Wenn nein, dann akzeptiere.

Problem: Die Berechnung von $S \Rightarrow_G^* w$ mit einem LBA ist **nichtdeterministisch**.
Der Test $S \Rightarrow_G^* w$ kann **fehlschlagen**, auch wenn $S \Rightarrow_G^* w$ gilt.

Lösung: Siehe Skript.