

Computerlinguistik I

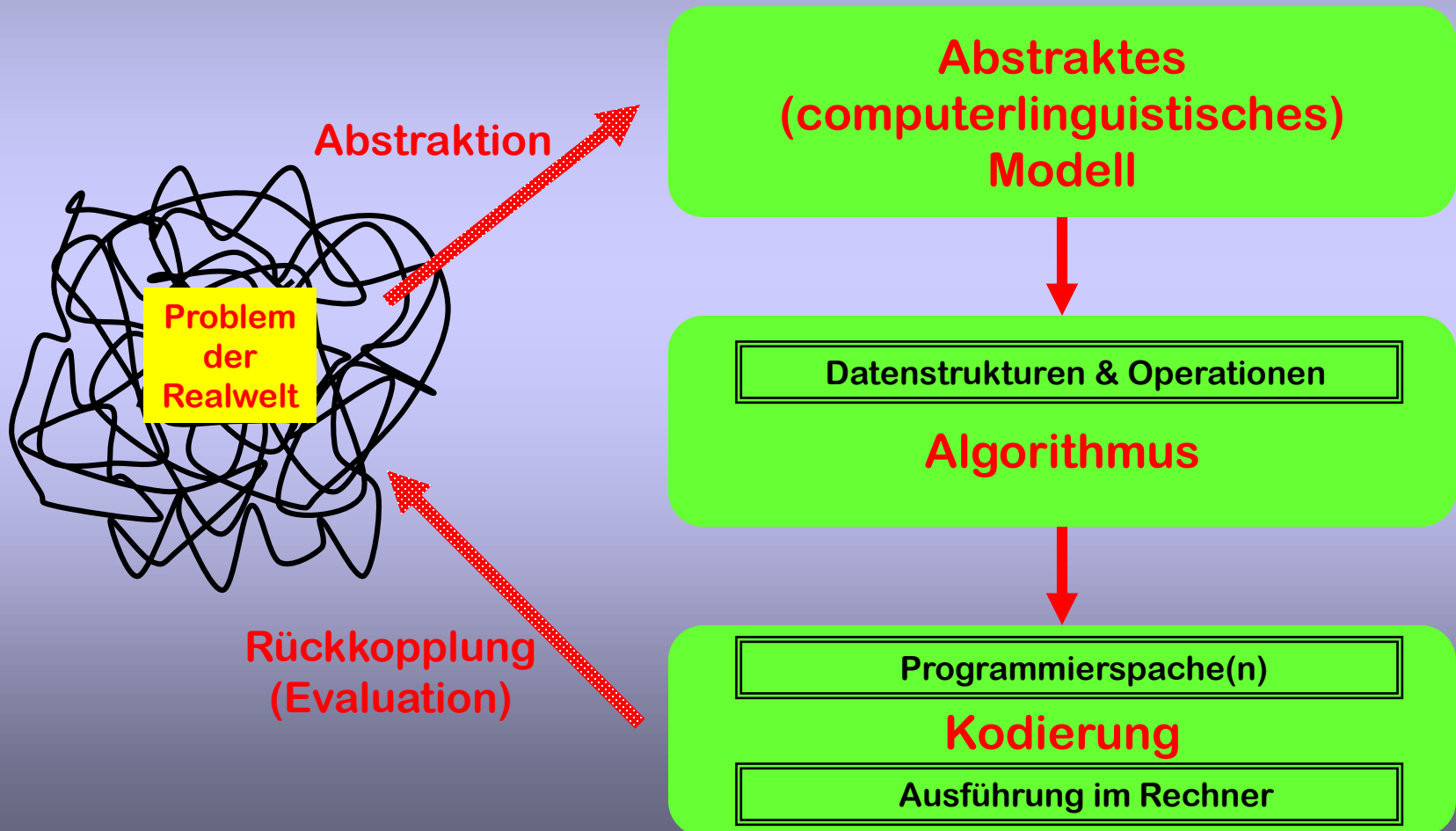
Vorlesung im WiSe 2018/19
(M-GSW-09)

Prof. Dr. Udo Hahn

Lehrstuhl für Computerlinguistik
Institut für Germanistische Sprachwissenschaft
Friedrich-Schiller-Universität Jena

<http://www.julielab.de>

Informatischer Problemlösungszyklus



Informatischer Problemlösungszyklus

- **Modellbildung**
 - **Abstraktion** von allen unwesentlichen Details der Problemstellung im Hinblick auf die algorithmische Lösung
 - Spezifikation der **logischen** Abhängigkeiten zwischen problemlösungsrelevanten Objekten
 - **(computer)linguistisches Wissen**

Informatischer Problemlösungszyklus

- **Algorithmisierung**
 - Übersetzung der modellbezogenen Spezifikation in
 - eine Menge von **Objekten** (Datenstrukturen) mit bestimmten Eigenschaften und Beziehungen zueinander
 - die erlaubten **Operationen** auf diesen Objekten
 - **Algorithmus**: (möglichst präzise) Beschreibung einer Folge zulässiger Operationen auf den Objekten, um das Problem zu lösen
 - **Computerlinguistische Kernexpertise**

Informatischer Problemlösungszyklus

- **Kodierung (Programmierung)**
 - Übersetzung der algorithmischen Spezifikation in Konstrukte einer (geeigneten) Programmiersprache
- **Ausführung des Programms**
 - Hier erst Bezug auf konkrete Maschinen (Datenstrukturen und Algorithmen sind abstrakte Konstruktionen)
 - Test-Modifikationszyklus ... Dokumentation !
 - **Informatisches Know-How**

Morphologische Prozesse: Flexion - Deflexion

- Kombination von **Grundformen** mit **Flexionsaffixen** (Kasus, Numerus, Tempus)
 - Deklination
 - **Land**: Land, Land**es**, Land**e**, L**ä**nder, L**ä**nder**n**
 - Konjugation
 - **landen**: land**e**, land**est**, land**et**, land**eten**, **gelandet**
- primär syntaktische, nur minimale semantische Information, keine grundlegenden Wortartwechsel

Morphologische Prozesse: Derivation - Dederivation

- Kombination von **Grundformen** mit **Derivationsaffixen**
 - **Land**: landen, verlanden, anlanden,
 - **Land**: Landung, Verlandung, Anlandung
 - **Land**: ländlich, verländlichen, Verländlichung
- modifizierende semantische Information, häufig mit Wortartwechsel verbunden

Morphologische Prozesse: Komposition - Dekomposition

- Kombination von Grundformen mit Grundformen (mittels Fugeninfixen)
 - Land: Landnahme, Landflucht, Landgang
 - Land: Heimatland, Ausland, Bauland
 - Land: Landesrekord, Landesverrat, Landsmann
 - Land: Inlandsflug, Landesratspräsidentengattin
- starke semantische Modifikation, fast keine Wortartwechsel
 - ... aber: Rotkehlchen, Weichteile

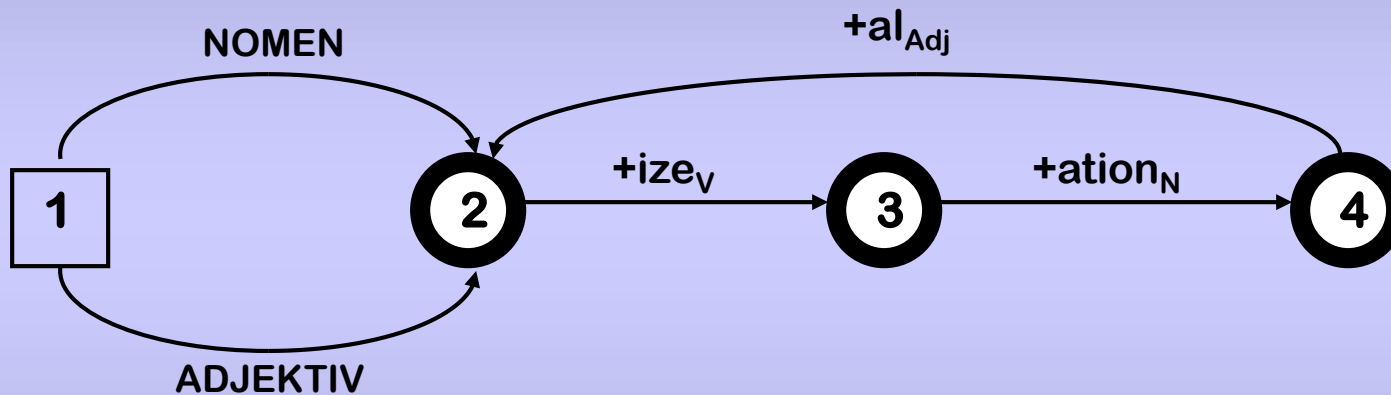
Lemmatisierung vs. Wort-Parsing

Eingabe	Lemma	Wort-Parse
Töchtern	Tochter	
Hauses	Haus	
sagte	sagen	
Spiegelungen	Spiegelung	
leichter	leicht	
verlängerte	verlängert	
	verlängern	

Lemmatisierung vs. Wort-Parsing

Eingabe	Lemma	Wort-Parse
Töchtern	Tochter	Tochter [+N, +FEM, +PL, +DAT]
Hauses	Haus	Haus [+N, +NEU, +SG, +GEN]
sagte	sagen	sagen [+V, +SG, {1P,3P}, +PAST]
Spiegelungen	Spiegelung	[Spiegel] _N [ung] _{ds} [+N, +FEM, +PL, {NOM,GEN,DAT,AKK}]
leichter	leicht	leicht [+Adj, +POS, +MAS, +SG, +NOM] [+Adj, +KOM]
verlängerte	verlängert	[ver] _{dp} [[lang] _{Adj} [er] _{ds} Adj[t] _{ds} [+Part, {MAS,FEM,NEU}, +SG, + DEF, +NOM] [+Part, {FEM,NEU}, +SG, + DEF, +AKK]
	verlängern	[ver] _{dp} [[lang] _{Adj} [er] _{ds} Adj[n] _{ds} [+V, +SG, {1P,3P}, +PAST]

Automat für Dederivation



NOMEN: hospital, motor, category, ...

ADJEKTIV: moral, concrete, tender, ...



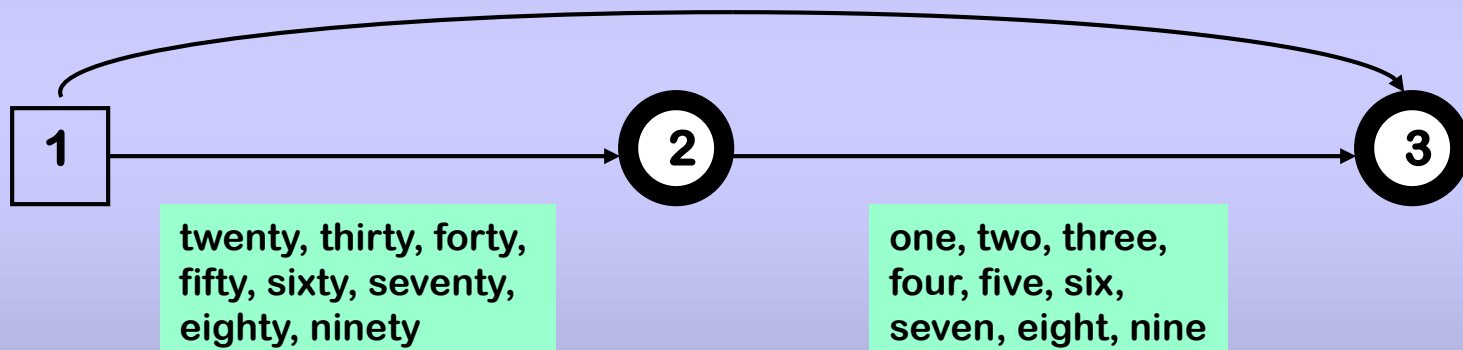
Anfangszustand



möglicher Endzustand

Automat für englische Zahlen von 1 bis 99

one, two, three, four, five, six, seven, eight, nine, ten,
eleven, twelve, thirteen, fourteen, fifteen, sixteen, seventeen, eighteen, nineteen



Mengentheoretische Grundbegriffe

- Die Zusammenfassung aller Elemente x , die eine Eigenschaft \mathcal{E} haben, wird als **Menge** M bezeichnet:

$$M := \{x \mid x \text{ hat die Eigenschaft } \mathcal{E} \}$$

Beispiele:

LAUF := $\{x \mid x \text{ ist deutsches Lexem, das mit „LAUF“ beginnt} \}$

EoR := $\{x \mid x \text{ ist deutsches Lexem, das auf „E“ oder „R“ endet} \}$

Mengentheoretische Grundbegriffe

- Seien M_1 und M_2 Mengen. M_1 ist **Teilmenge** von M_2 , falls aus $x \in M_1$ stets $x \in M_2$ folgt; symbolisch: $M_1 \subseteq M_2$.
- Gilt für zwei Mengen, M_1 und M_2 , einerseits $M_1 \subseteq M_2$ und andererseits $M_1 \neq M_2$, dann ist M_1 **echte Teilmenge** von M_2 ; symbolisch: $M_1 \subset M_2$

Beispiele:

$\text{LAUF}^* := \{\text{Laufbahn, laufen, Lauffeuer, Laufmaschine, Laufsteg}\} \subseteq \text{LAUF}$

$\text{LAUF} \subset \text{LA} := \{x \mid x \text{ ist deutsches Lexem, das mit „LA“ beginnt}\}$

$\text{R} := \{x \mid x \text{ ist deutsches Lexem, das auf „R“ endet}\} \subseteq \text{EoR}$

Mengentheoretische Grundbegriffe

- Gilt für zwei Mengen, M_1 und M_2 , sowohl $M_1 \subseteq M_2$ als auch $M_2 \subseteq M_1$, so folgt: $M_1 = M_2$ (**Mengengleichheit**).
- Die **leere Menge** ist die Menge, die kein Element enthält; symbolisch: $\{\}$ oder \emptyset .
 - Bemerkung: \emptyset ist Teilmenge jeder Menge.
- Die **Kardinalität** einer endlichen Menge M ist die Anzahl ihrer Elemente; symbolisch: $|M|$

Mengentheoretische Grundbegriffe

- Wenn M und N Mengen sind, dann charakterisiert die Menge

$$M \cap N := \{x \mid x \in M \text{ und } x \in N\}$$

den **Durchschnitt**

$$M \cup N := \{x \mid x \in M \text{ oder } x \in N\}$$

die **Vereinigung**

von M und N

Mengentheoretische Grundbegriffe

- **Beispiele:**

LAUF* := {Laufbahn, laufen, Lauffeuer, Laufmaschine, Laufsteg}

LAUF* \cap EoR

= { Lauffeuer, Laufmaschine }

{ Lauffeuer, Laufmaschine } \cup { Lauffeuer,
Laufpass }

= { Lauffeuer, Laufmaschine, Laufpass }

Mengentheoretische Grundbegriffe

- Wenn $I = \{1, \dots, n\}$ eine nichtleere Indexmenge ist und jedes $i \in I$ für M_i eine Menge charakterisiert, dann gilt als
 - Verallgemeinerung des **Durchschnitts**

$$\bigcap_{i \in I} M_i := \{x \mid x \in M_i \text{ für alle } i \in I\} = \bigcap_{i=1}^n M_i$$

- Verallgemeinerung der **Vereinigung**

$$\bigcup_{i \in I} M_i := \{x \mid x \in M_i \text{ f.mind.ein } i \in I\} = \bigcup_{i=1}^n M_i$$

Mengentheoretische Grundbegriffe

- Die Menge aller Teilmengen einer Menge M heißt **Potenzmenge**:

$$\wp(M) := \{ N \mid N \subseteq M \} = 2^M$$

Beispiel:

$\text{LAUFS} := \{ \text{Laufschritt, Laufstall, Laufsteg} \}$

$2^{\text{LAUFS}} = \{ \emptyset, \{ \text{Laufschritt} \}, \{ \text{Laufstall} \}, \{ \text{Laufsteg} \},$
 $\{ \text{Laufschritt, Laufstall} \}, \{ \text{Laufschritt, Laufsteg} \},$
 $\{ \text{Laufstall, Laufsteg} \}, \text{LAUFS} \}$

$| 2^{\text{LAUFS}} | = 2^3 = 8$

Mengentheoretische Grundbegriffe

- Das **Kartesische Produkt** von endlich vielen Mengen M_1, \dots, M_n , $n \geq 2$, ist die Menge aller **n-tupel**:

$$M_1 \times M_2 \times \dots \times M_n := \{ (m_1, \dots, m_n) \mid m_i \in M_i, 1 \leq i \leq n \}$$

Beispiel:

LAUFB := { Laufbahn, Laufbursche }

LAUFS := { Laufschrift, Laufstall, Laufsteg }

LAUFB \times LAUFS = { (Laufbahn, Laufschrift), (Laufbahn, Laufstall),
(Laufbahn, Laufsteg), (Laufbursche, Laufschrift),
(Laufbursche, Laufstall), (Laufbursche, Laufsteg) } ²⁰

Grundbegriffe zu Relationen

- Eine (zweistellige) **Relation** ρ zwischen zwei Mengen M_1 und M_2 ist eine Teilmenge von $M_1 \times M_2$, d.h. $\rho \subseteq M_1 \times M_2$. Man schreibt auch $m \rho n$ für $(m,n) \in \rho$.

Beispiel:

GleicheLänge \subseteq DLexeme x DLexeme

GleicheLänge = { (du, da), (da, Ei), (er, es), (Dom, Bor),
(Aal, Tor), (Bild, Tier), (Tiger, Sekte),... }

Grundbegriffe zu Relationen

- Eine Relation ρ auf einer nichtleeren Menge M heißt **Äquivalenzrelation**, wenn
 - $m \rho m$ für jedes $m \in M$ (reflexiv)
 - aus $m \rho n$ folgt $n \rho m$ (symmetrisch)
 - aus $k \rho m$ und $m \rho n$ folgt $k \rho n$ (transitiv)

Beispiel:

Gleiche Länge ist Äquivalenzrelation:

(1) reflexiv: (du, du), (da, da), (Ei, Ei), (Aal, Aal), (Tiger, Tiger), ...

(2) symmetrisch: (Aal, Tor) \Rightarrow (Tor, Aal), (Tiger, Sekte) \Rightarrow (Sekte, Tiger), ...

(3) transitiv: (du, da), (da, Ei) \Rightarrow (du, Ei),

(Bild, Tier), (Tier, Rand) \Rightarrow (Bild, Rand), ...

Grundbegriffe zu Relationen

- Ist ρ eine Äquivalenzrelation auf einer Menge M , dann heißt jede Menge $[m] := \{ n \mid m \rho n \}$ für ein $m \in M$ die von m repräsentierte **Äquivalenzklasse**.
- Jede Äquivalenzrelation auf M bewirkt eine Einteilung von M in paarweise disjunkte (d.h. elementfreie) Äquivalenzklassen.

Beispiele:

$[da] = \{ Ei, er, es, du, \dots \}$

$[Aal] = \{ Tor, Bor, elf, vom, \dots \}$

$[Bild] = \{ Tier, Rand, grün, hell, \dots \}$

Grundbegriffe zu Relationen

- Eine **Halbordnung** (**partielle Ordnung**) auf einer Menge M ist eine Relation „ $<$ “ auf M mit den Eigenschaften
 - aus $k < m$ und $m < n$ folgt: $k < n$ (**transitiv**)
 - für kein $m \in M$ gilt: $m < m$ (**irreflexiv**)

Beispiel:

Ist_Unterbegriff \subseteq DLexeme x DLexeme

Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ), (KFZ, Artefakt),
(Artefakt, Objekt), (Schreibtisch, Möbel), (Möbel, Artefakt) }

Grundbegriffe zu Relationen

- Eine **lineare Ordnung** (**totale Ordnung**) auf einer Menge M ist eine Halbordnung „ $<$ “ auf M , bei der für beliebige $m, n \in M$ entweder $m < n$ oder $n < m$ oder $m = n$ gilt.

Beispiel:

Lexikographisch_Vor \subseteq DLexeme x DLexeme

Lexikographisch_Vor

= { (Aal, Bild), (Bild, Rand), (Rand, Tiger), (Stelle, Stiel),
(Stiel, Stil), (Stil, Stunde), (Klee, Zone), ... }

Grundbegriffe zu Relationen

- Das **Produkt** zweier Relationen, ρ und σ auf M , ist festgelegt durch

$$\rho \sigma := \{ (x, z) \mid (x, y) \in \rho \text{ und } (y, z) \in \sigma \text{ f.e. } y \in M \}$$

Grundbegriffe zu Relationen

- Für eine beliebige Relation ρ auf M definiert
 - $\rho^0 := \{ (m,m) \mid m \in M \}$ die **Diagonale**,
 - $\rho^1 := \rho$ und $\rho^i := \rho^{i-1} \rho$ für $i > 1$
 - $\rho^+ := \bigcup_{i \geq 1} \rho^i = \rho^1 \cup \rho^2 \cup \dots \cup \rho^n$
die **transitive Hülle** von ρ ,
 - $\rho^* := \bigcup_{i \geq 0} \rho^i = \rho^0 \cup \rho^1 \cup \rho^2 \cup \dots \cup \rho^n$
die **reflexive und transitive Hülle** von ρ

Transitive Hülle von „*Ist_Unterbegriff*“

Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ),
(KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch,
Möbel), (Möbel, Artefakt) }

Transitive Hülle von „*Ist_Unterbegriff*“

Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ),
(KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch,
Möbel), (Möbel, Artefakt) }

*Ist_Unterbegriff*¹ = *Ist_Unterbegriff*

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ),
(KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch,
Möbel), (Möbel, Artefakt) }

Transitive Hülle von „*Ist_Unterbegriff*“

Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ), (KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch, Möbel), (Möbel, Artefakt) }

Ist_Unterbegriff¹ = Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ), (KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch, Möbel), (Möbel, Artefakt) }

Ist_Unterbegriff² = Ist_Unterbegriff¹ Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, PKW) }

Transitive Hülle von „Ist_Unterbegriff“

Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ),
(KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch,
Möbel), (Möbel, Artefakt) }

Ist_Unterbegriff¹ = Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ),
(KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch,
Möbel), (Möbel, Artefakt) }

Ist_Unterbegriff² = Ist_Unterbegriff¹ Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, PKW), (VW-PKW, KFZ) }

Transitive Hülle von „*Ist_Unterbegriff*“

Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ),
(KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch,
Möbel), (Möbel, Artefakt) }

Ist_Unterbegriff¹ = Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ),
(KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch,
Möbel), (Möbel, Artefakt) }

Ist_Unterbegriff² = Ist_Unterbegriff¹ Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, PKW), (VW-PKW, KFZ), (PKW, Artefakt) }

Transitive Hülle von „Ist_Unterbegriff“

Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ), (KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch, Möbel), (Möbel, Artefakt) }

Ist_Unterbegriff¹ = Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ), (KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch, Möbel), (Möbel, Artefakt) }

Ist_Unterbegriff² = Ist_Unterbegriff¹ Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, PKW), (VW-PKW, KFZ), (PKW, Artefakt), (KFZ, Objekt) }

Transitive Hülle von „*Ist_Unterbegriff*“

Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ), (KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch, Möbel), (Möbel, Artefakt) }

Ist_Unterbegriff¹ = Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ), (KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch, Möbel), (Möbel, Artefakt) }

Ist_Unterbegriff² = Ist_Unterbegriff¹ Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, PKW), (VW-PKW, KFZ), (PKW, Artefakt), (KFZ, Objekt), (Schreibtisch, Artefakt) }

Transitive Hülle von „Ist_Unterbegriff“

Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ), (KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch, Möbel), (Möbel, Artefakt) }

Ist_Unterbegriff¹ = Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ), (KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch, Möbel), (Möbel, Artefakt) }

Ist_Unterbegriff² = Ist_Unterbegriff¹ Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, PKW), (VW-PKW, KFZ), (PKW, Artefakt), (KFZ, Objekt), (Schreibtisch, Artefakt), (Möbel, Objekt) }

Transitive Hülle von „*Ist_Unterbegriff*“

Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ),
(KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch,
Möbel), (Möbel, Artefakt) }

Ist_Unterbegriff² = Ist_Unterbegriff¹ Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, PKW), (VW-PKW, KFZ), (PKW, Artefakt),
(KFZ, Objekt), (Schreibtisch, Artefakt), (Möbel, Objekt) }

Ist_Unterbegriff³ = Ist_Unterbegriff² Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, KFZ) }

Transitive Hülle von „*Ist_Unterbegriff*“

Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ),
(KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch,
Möbel), (Möbel, Artefakt) }

Ist_Unterbegriff² = Ist_Unterbegriff¹ Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, PKW), (VW-PKW, KFZ), (PKW, Artefakt),
(KFZ, Objekt), (Schreibtisch, Artefakt), (Möbel, Objekt) }

Ist_Unterbegriff³ = Ist_Unterbegriff² Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, KFZ), (VW-PKW, Artefakt) }

Transitive Hülle von „*Ist_Unterbegriff*“

Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ), (KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch, Möbel), (Möbel, Artefakt) }

Ist_Unterbegriff² = Ist_Unterbegriff¹ Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, PKW), (VW-PKW, KFZ), (PKW, Artefakt), (KFZ, Objekt), (Schreibtisch, Artefakt), (Möbel, Objekt) }

Ist_Unterbegriff³ = Ist_Unterbegriff² Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, KFZ), (VW-PKW, Artefakt), (PKW, Objekt) }

Transitive Hülle von „Ist_Unterbegriff“

Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ), (KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch, Möbel), (Möbel, Artefakt) }

Ist_Unterbegriff² = Ist_Unterbegriff¹ Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, PKW), (VW-PKW, KFZ), (PKW, Artefakt), (KFZ, Objekt), (Schreibtisch, Artefakt), (Möbel, Objekt) }

Ist_Unterbegriff³ = Ist_Unterbegriff² Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, KFZ), (VW-PKW, Artefakt), (PKW, Objekt), (Schreibtisch, Objekt) }

Transitive Hülle von „*Ist_Unterbegriff*“

Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ),
(KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch,
Möbel), (Möbel, Artefakt) }

*Ist_Unterbegriff*² = *Ist_Unterbegriff*¹ *Ist_Unterbegriff*

= { (VW-Golf, PKW), (VW-PKW, KFZ), (PKW, Artefakt),
(KFZ, Objekt), (Schreibtisch, Artefakt), (Möbel, Objekt) }

*Ist_Unterbegriff*³ = *Ist_Unterbegriff*² *Ist_Unterbegriff*

= { (VW-Golf, KFZ), (VW-PKW, Artefakt), (PKW, Objekt),
(Schreibtisch, Objekt) }

*Ist_Unterbegriff*⁴ = *Ist_Unterbegriff*³ *Ist_Unterbegriff*

= { (VW-Golf, Artefakt) }

Transitive Hülle von „*Ist_Unterbegriff*“

Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ), (KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch, Möbel), (Möbel, Artefakt) }

*Ist_Unterbegriff*² = *Ist_Unterbegriff*¹ *Ist_Unterbegriff*

= { (VW-Golf, PKW), (VW-PKW, KFZ), (PKW, Artefakt), (KFZ, Objekt), (Schreibtisch, Artefakt), (Möbel, Objekt) }

*Ist_Unterbegriff*³ = *Ist_Unterbegriff*² *Ist_Unterbegriff*

= { (VW-Golf, KFZ), (VW-PKW, Artefakt), (PKW, Objekt), (Schreibtisch, Objekt) }

*Ist_Unterbegriff*⁴ = *Ist_Unterbegriff*³ *Ist_Unterbegriff*

= { (VW-Golf, Artefakt), (VW-PKW, Objekt) }

Transitive Hülle von „*Ist_Unterbegriff*“

Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ), (KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch, Möbel), (Möbel, Artefakt) }

*Ist_Unterbegriff*² = *Ist_Unterbegriff*¹ *Ist_Unterbegriff*

= { (VW-Golf, PKW), (VW-PKW, KFZ), (PKW, Artefakt), (KFZ, Objekt), (Schreibtisch, Artefakt), (Möbel, Objekt) }

*Ist_Unterbegriff*³ = *Ist_Unterbegriff*² *Ist_Unterbegriff*

= { (VW-Golf, KFZ), (VW-PKW, Artefakt), (PKW, Objekt), (Schreibtisch, Objekt) }

*Ist_Unterbegriff*⁴ = *Ist_Unterbegriff*³ *Ist_Unterbegriff*

= { (VW-Golf, Artefakt), (VW-PKW, Objekt) }

*Ist_Unterbegriff*⁵ = *Ist_Unterbegriff*⁴ *Ist_Unterbegriff*

= { (VW-Golf, Objekt) }

Transitive Hülle von „Ist_Unterbegriff“

Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ), (KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch, Möbel), (Möbel, Artefakt) }

Ist_Unterbegriff² = Ist_Unterbegriff¹ Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, PKW), (VW-PKW, KFZ), (PKW, Artefakt), (KFZ, Objekt), (Schreibtisch, Artefakt), (Möbel, Objekt) }

Ist_Unterbegriff³ = Ist_Unterbegriff² Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, KFZ), (VW-PKW, Artefakt), (PKW, Objekt), (Schreibtisch, Objekt) }

Ist_Unterbegriff⁴ = Ist_Unterbegriff³ Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, Artefakt), (VW-PKW, Objekt) }

Ist_Unterbegriff⁵ = Ist_Unterbegriff⁴ Ist_Unterbegriff

= { (VW-Golf, Objekt) }




Ist_Unterbegriff⁶ = Ist_Unterbegriff⁵ Ist_Unterbegriff = ⁴³{ }

Transitive Hülle von „Ist_Unterbegriff“

$$\bigcup_{i \geq 1} \text{Ist_Unterbegriff}^i = \text{Ist_Unterbegriff}^1 \cup \text{Ist_Unterbegriff}^2 \cup \dots \cup \text{Ist_Unterbegriff}^n$$

= { (VW-Golf, VW-PKW), (VW-PKW, PKW), (PKW, KFZ), (KFZ, Artefakt), (Artefakt, Objekt), (Schreibtisch, Möbel), (Möbel, Artefakt), (VW-Golf, PKW), (VW-PKW, KFZ), (PKW, Artefakt), (KFZ, Objekt), (Schreibtisch, Artefakt), (Möbel, Objekt), (VW-Golf, KFZ), (VW-PKW, Artefakt), (PKW, Objekt), (Schreibtisch, Objekt), (VW-Golf, Artefakt), (VW-PKW, Objekt), (VW-Golf, Objekt) }

Grundlagen formaler Sprachen: Alphabet

- Sei Σ ein beliebiges **Alphabet**, d.i. eine Menge von Symbolen oder Zeichen
 - **Beispiele für verbreitete Alphabete:**
 - {A,B,C, ..., X,Y,Z} lateinisches Alphabet
 - {1,2,3, ..., 7,8,9, 0} indisch-arabisches Zahlensystem
 - {0,1} Binärzahlen
 - {  ,  ,  } internat. Ampelalphabet
 - {A[denin], G[uanin], T[hymin], C[ytosin]} Basen-Alphabet der DNA

Grundlagen formaler Sprachen: Wörter

- Seien **Wörter** (**Sätze**, **Strings**, **Ketten**) über einem Alphabet Σ in der folgenden Weise definiert:
 1. ε ist ein Wort über Σ (ε ist das Leerwort, das keine Symbole hat)
 2. falls χ ein Wort über Σ und $\alpha \in \Sigma$ ist, dann ist $\chi \alpha$ ein Wort über Σ
 3. γ ist ein Wort über Σ genau dann, wenn sein Bildung aus (1) oder (2) folgt

Grundlagen formaler Sprachen: Konkatenation von Wörtern

- Das Wort $\omega \circ \tau := \omega \tau := \omega_1 \dots \omega_m \tau_1 \dots \tau_n$ heißt **Konkatenation** von ω und τ , falls $\omega = \omega_1 \dots \omega_m$ und $\tau = \tau_1 \dots \tau_n$ ($\omega_i, \tau_j \in \Sigma$) Wörter über Σ sind; „o“ (sprich: „Kringel“) ist der Konkatenationsoperator.
 - Für alle Wörter ω gilt: $\omega \circ \varepsilon = \varepsilon \circ \omega = \omega$

Beispiele für Konkatenationen:

- $ABC \circ X = ABCX$
- $24 \circ 24 = 2424$
- $wort \circ stamm = wortstamm$

Formale Grundlagen von Automaten: formale Sprache

- Eine (**formale**) **Sprache** \mathcal{L} über einem Alphabet Σ ist eine Menge von Ketten über Σ .
- Sei ferner Σ^* (bzw. Σ^+) die Menge *aller* Ketten über Σ unter Einschluss (bzw. Ausschluss) von ε .
- Dann gilt für jede Sprache \mathcal{L} über Σ :

$$\mathcal{L} \subseteq \Sigma^*$$

Beispiele für formale Sprachen

- $\Sigma = \{A, B, C, \dots, X, Y, Z, _ \}$
 - $\mathcal{L}_1 = \{GUTEN_TAG, GUTEN, TAG\}$
= $\{GUTEN, GUTEN_TAG, TAG\}$
 - $\mathcal{L}_2 = \{GTNTG, GTN, TG\}$
 - $\mathcal{L}_3 = \{TNT, TN, T\}$
 - $\mathcal{L}_4 = \{GG, GTTG, GGGG, GGTTGG, \dots\}$
 - $\mathcal{L}_5 = \{A, C, G, T, ACCGTG, \dots\}$

Beispiele für formale Sprachen

- $\Sigma = \{0, 1, 2, 3, \dots, 7, 8, 9, +, -, =\}$
 - $\mathcal{L}_1 = \{5+7=20-8, 5+7=5+8, 5759=57-59\}$
 - $\mathcal{L}_2 = \{5+=7-2=, +++, 1-11782---3\}$
 - $\mathcal{L}_3 = \{3, 33, 333, 3333, 33333, \dots\}$

Beispiele für formale Sprachen

$\Sigma = \{\text{NOMEN}, \text{ADJEKTIV}, +\text{ize}_V, +\text{ation}_N, +\text{al}_{\text{Adj}}\}$

– $\mathcal{L}_1 = \{\text{hospital}, \text{hospital}+\text{ize}_V,$
 $\text{hospital} +\text{ize}_V+\text{ation}_N, \dots \}$

– $\mathcal{L}_2 = \{\text{hospital}, \text{moral},$
 $\text{hospital}+\text{ize}_V, \text{moral}+\text{ize}_V, \dots \}$

– $\mathcal{L}_3 = \{ +\text{ize}_V, +\text{ize}_V+\text{ize}_V, +\text{ize}_V+\text{ize}_V\text{hospital}, \dots \}$

NOMEN: hospital, motor, category, ...

ADJEKTIV: moral, concrete, tender, ...

Grundlagen formaler Sprachen: Wortmengen

- Eine **Wortmenge (Sprache)** \mathcal{F} bezüglich eines Alphabets Σ ist gegeben durch

$$\mathcal{F} := \{ \omega \mid \omega \text{ ist Wort über } \Sigma \}$$

Grundlagen formaler Sprachen: Konkatenation von Wortmengen

- Die **Zusammensetzung (Konkatenation)** von **Wortmengen** \mathcal{F} und \mathcal{M} ist gegeben durch

$$\mathcal{F} \circ \mathcal{M} := \mathcal{F} \mathcal{M} := \{ \omega\tau \mid \omega \in \mathcal{F}, \tau \in \mathcal{M} \}$$

- Dabei gilt:

$$\mathcal{F} \{ \varepsilon \} = \{ \varepsilon \} \mathcal{F} = \mathcal{F}$$

$$\mathcal{F} \emptyset = \emptyset \mathcal{F} = \emptyset$$

Beispiele für Konkatenationen:

- $\text{DLex} := \{\text{Fisch, Fest, Fleck}\}; \text{DEnd} := \{\text{e, es, er}\}$
- $\text{DLex} \circ \text{DEnd} = \{\text{Fische, Fisches, Fischer, Feste, Festes, Fester, Flecke, Fleckes, Flecker}\}$

Grundlagen formaler Sprachen:

Potenzen von Wörtern bzw. Wortmengen

- **Potenzen** von **Wörtern** ω bzw. **Wortmengen** \mathcal{F} sind gegeben durch:

$$- \omega^0 := \varepsilon \quad \omega^1 := \omega \quad \omega^i := \omega^{i-1} \omega, \text{ für } i \geq 1$$

$$- \mathcal{F}^0 := \{\varepsilon\} \quad \mathcal{F}^1 := \mathcal{F} \quad \mathcal{F}^i := \mathcal{F}^{i-1} \mathcal{F}, \text{ für } i \geq 1$$

Beispiele für Potenzen von Wortmengen:

- **DSilbe** := {ba, di, ko}

- **DSilbe**⁰ = { ε }, **DSilbe**¹ = {ba, di, ko}

- **DSilbe**² = **DSilbe**¹ **DSilbe**

$$= \{ \text{baba, badi, bako, diba, didi, diko, koba, kodi, koko} \}$$

- **DSilbe**³ = **DSilbe**² **DSilbe**

Grundlagen formaler Sprachen: Plus- und Sternhülle – formale Sprache

- Die **Plushülle** bzw. **Sternhülle** einer Wortmenge \mathcal{F} werden definiert durch:

$$\mathcal{F}^+ := \bigcup_{i \geq 1} \mathcal{F}^i$$

$$\mathcal{F}^* := \bigcup_{i \geq 0} \mathcal{F}^i$$

- Ist Σ ein Alphabet, dann ist Σ^* die Gesamtheit aller Wörter über Σ . Jede Teilmenge dieser Sternhülle, $\mathcal{L} \subseteq \Sigma^*$, heißt **formale Sprache** über Σ .

Endlicher Automat (1/2)

- Ein endlicher Automat (*finite-state automaton, FSA*) ist ein formales System zur **Erkennung von** ([einer beschränkten Menge! von]) **formalen Sprachen**.
- Ein FSA beginnt den Erkennungsprozess in seinem ausgezeichneten **Startzustand**. Falls der FSA die Eingabe komplett gelesen hat und er sich in einem der ausgezeichneten **Endzustände** befindet, hat er die Eingabe **akzeptiert**, sonst nicht.

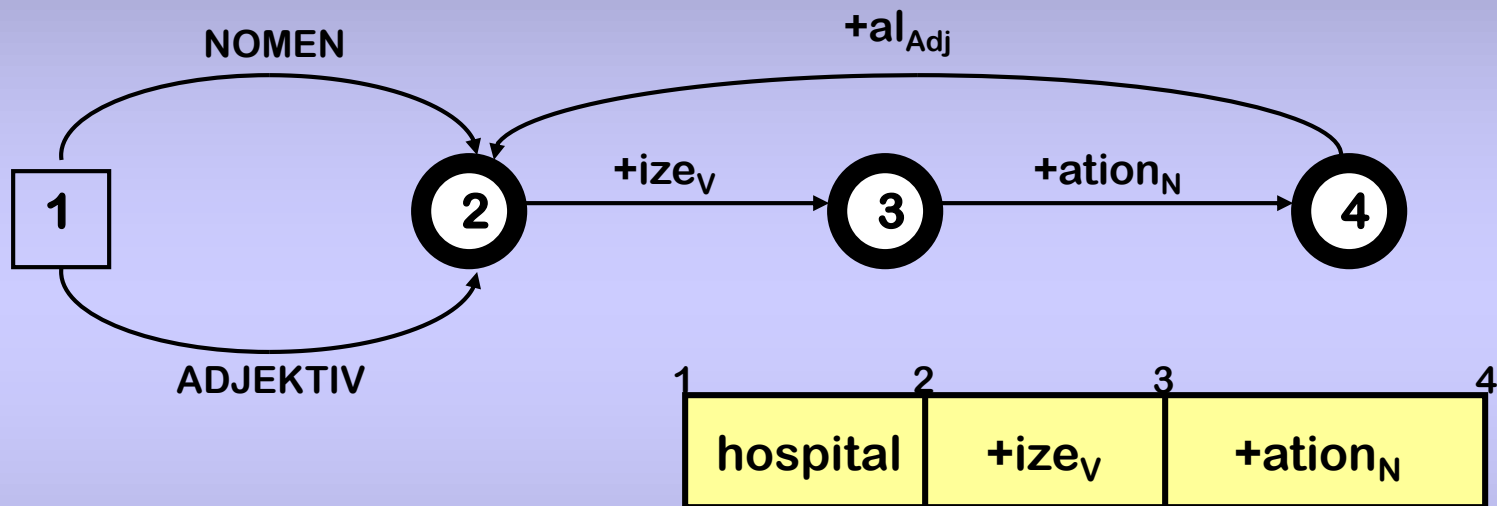
Endlicher Automat (2/2)

- Ein FSA besteht i.A. aus einem **Eingabeband**, auf dem der zu akzeptierende Ausdruck steht, und einem endlichen **Steuerungsmechanismus**, der die Form der erlaubten Zustandsänderungen (Bewegungen) determiniert.
- Die **Zustandsänderungsfunktion** gibt an, welche möglichen Folgezustände aus dem aktuellen Zustand und dem aktuellen Symbol auf dem Eingabeband erreichbar sind.

Formale Grundlagen von Automaten: endlicher Automat

- Ein (nicht-deterministischer) **endlicher Automat** ist ein 5-Tupel $(Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ mit
 - **Q**: endliche Menge von (Steuerungs-)Zuständen
 $q_0, q_1, q_2, \dots, q_n$
 - **Σ** : endliches Eingabealphabet
 - **δ** : Zustandsübergangsfunktion, die das Steuerungsverhalten des FSA determiniert
$$\delta : Q \times \Sigma \mapsto \wp(Q)$$
 - **$q_0 \in Q$** : der ausgezeichnete Startzustand
 - **$F \subseteq Q$** : Menge der ausgezeichneten Endzustände

Graph- und Funktionsnotation für Dederivationsautomaten (1/2)



NOMEN: hospital, motor, category, ...

ADJEKTIV: moral, concrete, tender, ...

$$\delta(1, \text{hospital}) = 2$$

$$\delta(2, +ize_v) = 3$$

$$\delta(3, +ation_N) = 4$$

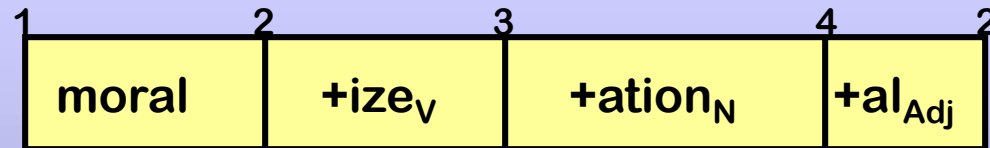
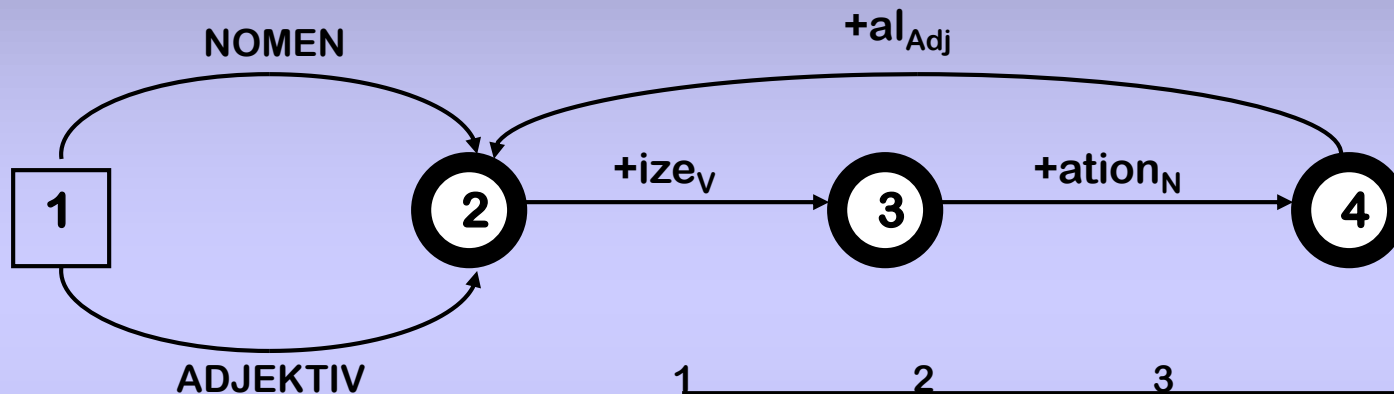


Anfangszustand



möglicher Endzustand

Graph- und Funktionsnotation für Dederivationsautomaten (2/2)



NOMEN: hospital, motor, category, ...

ADJEKTIV: moral, concrete, tender, ...

$$\begin{array}{ll}
 \delta(1, \text{hospital}) = 2 & \delta(1, \text{moral}) = 2 \\
 \delta(2, +ize_v) = 3 & \delta(2, +ize_v) = 3 \\
 \delta(3, +ation_N) = 4 & \delta(3, +ation_N) = 4 \\
 & \delta(4, +al_{Adj}) = 2
 \end{array}$$

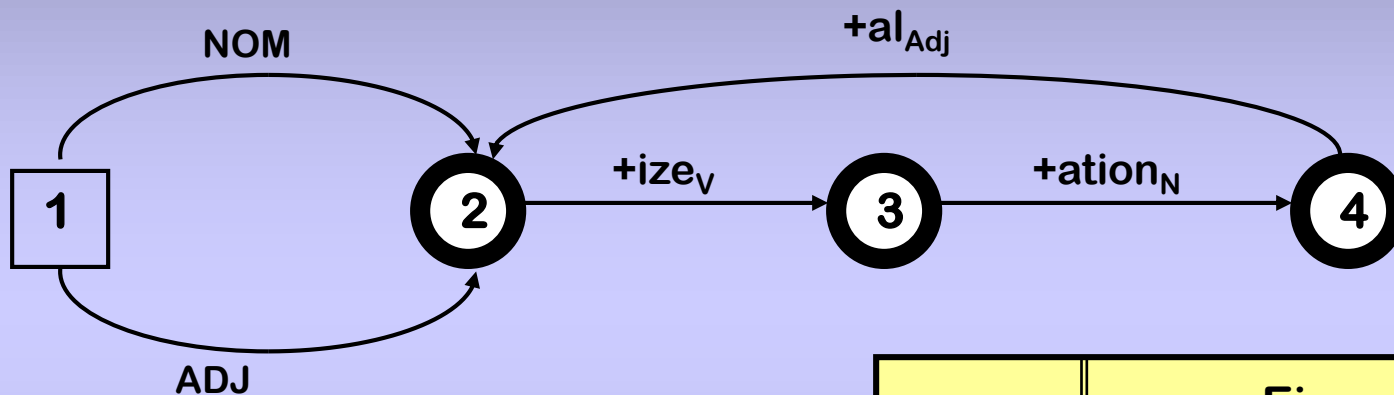


Anfangszustand



möglicher Endzustand

Graph- und Tabellennotation für Dederivationsautomaten

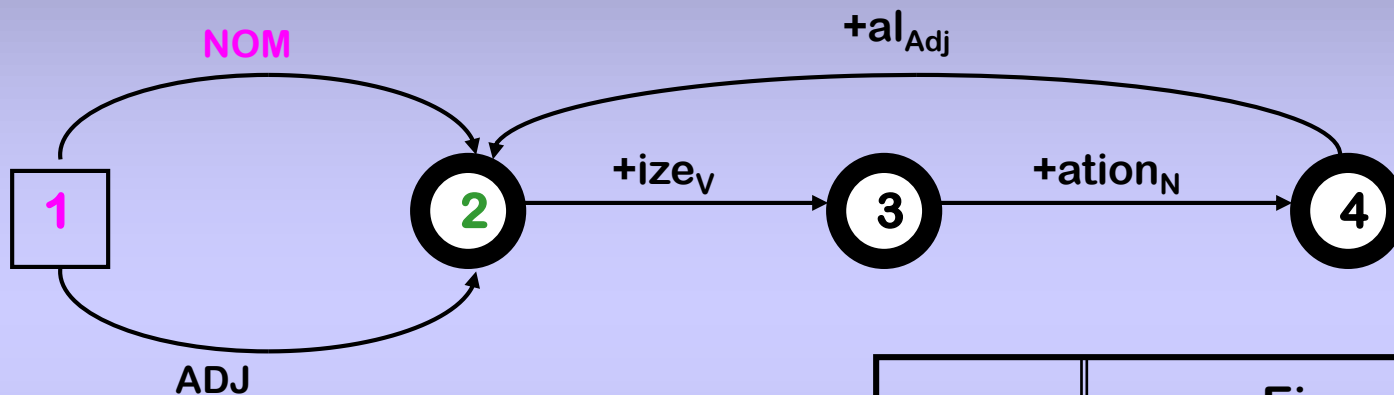


n Anfangszustand

n möglicher Endzustand

Zustand	Eingabesymbol			
	NOM ADJ	+ize _v	+ation _N	+al _{Adj}
1	2	0	0	0
<u>2</u>	0	3	0	0
<u>3</u>	0	0	4	0
<u>4</u>	0	0	0	2

Graph- und Tabellennotation für Dederivationsautomaten

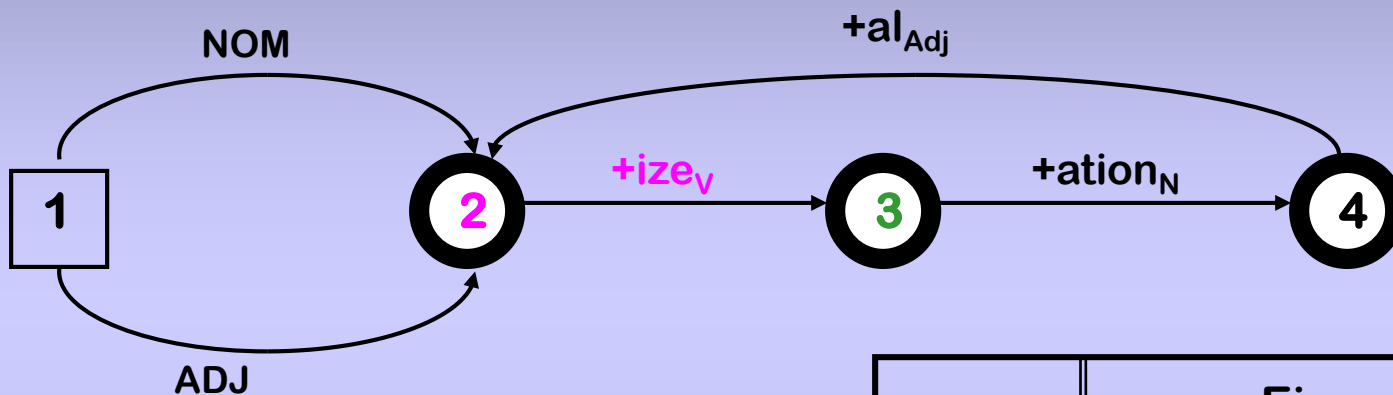


n Anfangszustand

n möglicher Endzustand

Zustand	Eingabesymbol			
	NOM ADJ	+ize _v	+ation _N	+al _{Adj}
<u>1</u>	2	0	0	0
<u>2</u>	0	3	0	0
<u>3</u>	0	0	4	0
<u>4</u>	0	0	0	2

Graph- und Tabellennotation für Dederivationsautomaten

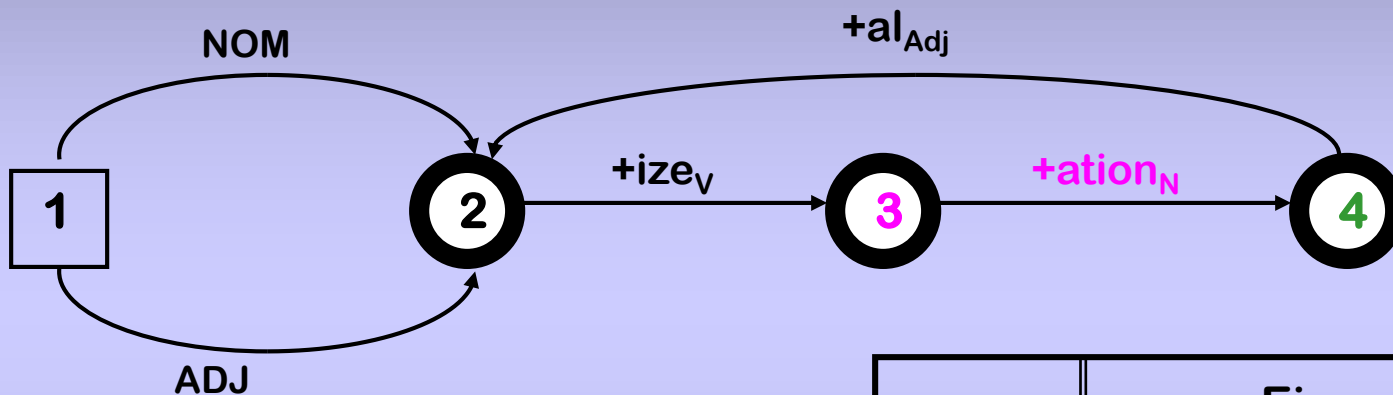


n Anfangszustand

n möglicher Endzustand

Zustand	Eingabesymbol			
	NOM ADJ	+ize _v	+ation _N	+al _{Adj}
1	2	0	0	0
2	0	3	0	0
3	0	0	4	0
4	0	0	0	2

Graph- und Tabellennotation für Dederivationsautomaten

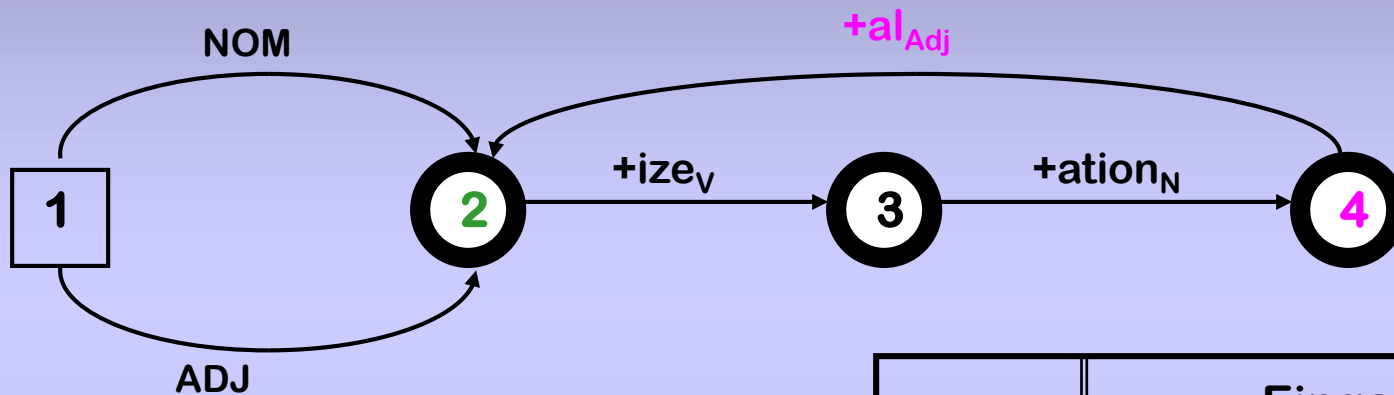


n Anfangszustand

n möglicher Endzustand

Zustand	Eingabesymbol			
	NOM ADJ	+ize _v	+ation _N	+al _{Adj}
1	2	0	0	0
<u>2</u>	0	3	0	0
3	0	0	4	0
<u>4</u>	0	0	0	2

Graph- und Tabellennotation für Dederivationsautomaten

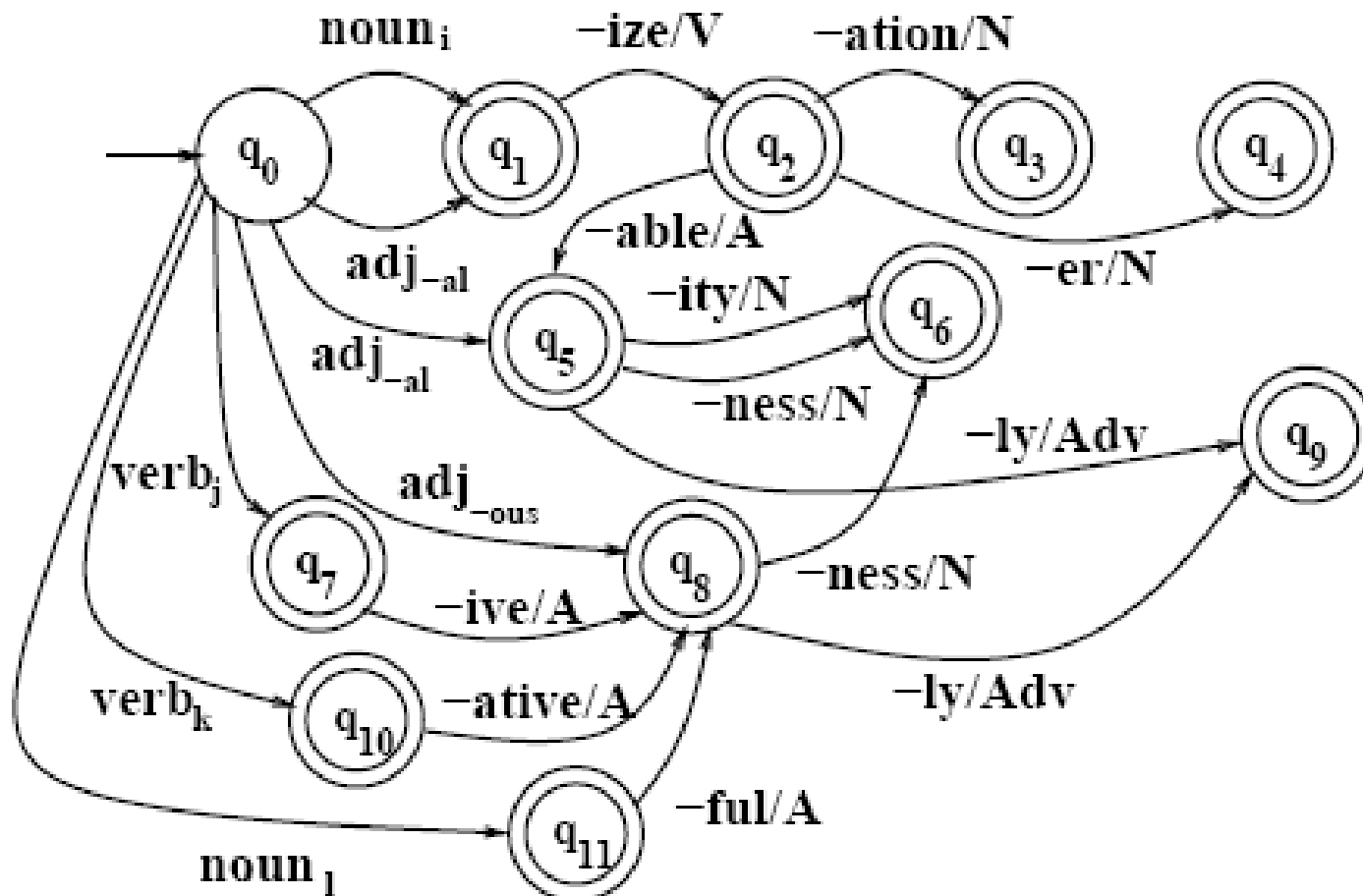


n Anfangszustand

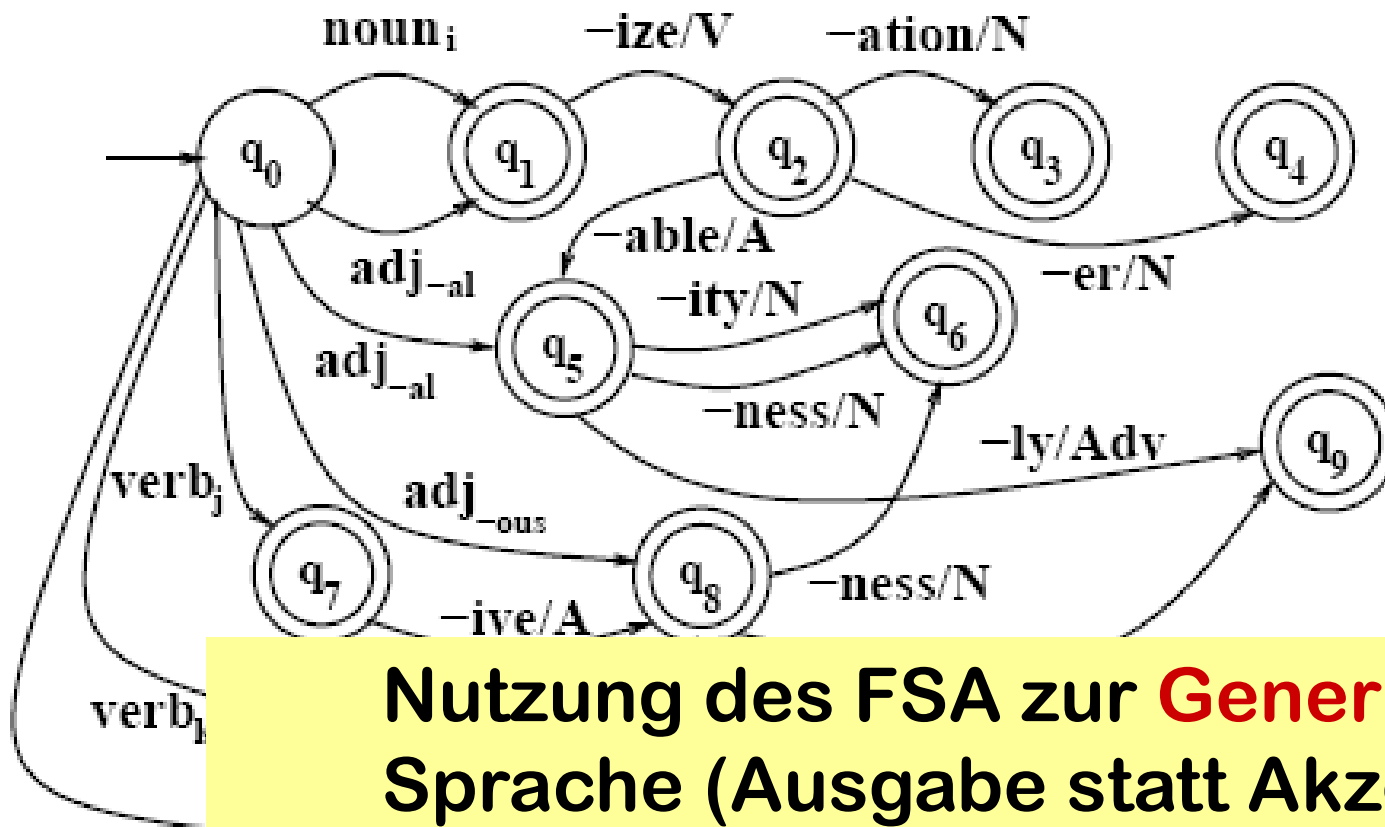
n möglicher Endzustand

Zustand	Eingabesymbol			
	NOM ADJ	+ize _v	+ation _N	+al _{Adj}
1	2	0	0	0
<u>2</u>	0	3	0	0
<u>3</u>	0	0	4	0
<u>4</u>	0	0	0	2

Komplexerer Dederivationsautomat



Komplexerer Dederivationsautomat



Nutzung des FSA zur **Generierung** von Sprache (Ausgabe statt Akzeptanz von Symbolen bei Kantentraversierung);
FSA definiert Sprache!

Formale Grundlagen von Automaten: endlicher Automat

- Ein (nicht-deterministischer) **endlicher Automat** ist ein 5-Tupel $(Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ mit
 - **Q**: endliche Menge von (Steuerungs-)Zuständen
 $q_0, q_1, q_2, \dots, q_n$
 - **Σ** : endliches Eingabealphabet
 - **δ** : Zustandsübergangsfunktion, die das Steuerungsverhalten des FSA determiniert
$$\delta : Q \times \Sigma \mapsto \wp(Q)$$
 - **$q_0 \in Q$** : der ausgezeichnete Startzustand
 - **$F \subseteq Q$** : Menge der ausgezeichneten Endzustände

Formale Grundlagen von Automaten: Konfiguration

- Sei $FSA = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ ein (nicht-deterministischer) endlicher Automat.

Dann heiße ein Paar $(q, \omega) \in Q \times \Sigma^*$ eine **Konfiguration** von FSA.

Eine Konfiguration der Form (q_0, ω) heiße **initiale Konfiguration**, eine der Form (q, ε) , wobei $q \in F$, heiße **akzeptierende** bzw. **Endkonfiguration**.

Formale Grundlagen von Automaten: Bewegung

- Sei $FSA = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ ein (nicht-deterministischer) endlicher Automat.

Eine **Bewegung** in FSA wird durch eine binäre Relation \vdash_{FSA} („geht unter FSA nach“) über Konfigurationen repräsentiert:

$$\vdash_{FSA} \subseteq Q \times \Sigma^*$$

Formale Grundlagen von Automaten: Bewegung

- Sei $FSA = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ ein (nicht-deterministischer) endlicher Automat.

Eine **Bewegung** in FSA wird durch eine binäre Relation \vdash_{FSA} („geht unter FSA nach“) über Konfigurationen repräsentiert.

Falls $q' \in \delta(q, \tau)$ (q' ist also ein möglicher Folgezustand von q , $\tau \in \Sigma$), dann gilt:

$$(q, \tau\gamma) \vdash_{FSA} (q', \gamma) \text{ für alle } \gamma \in \Sigma^*$$

Formale Grundlagen von Automaten: Akzeptanz

- Sei $FSA = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ ein (nicht-deterministischer) endlicher Automat und \vdash_{FSA}^* die reflexive und transitive Hülle von \vdash_{FSA} .

– reflexive Hülle:

- $(q, \tau) \vdash_{FSA} (q, \tau)$ für alle $(q, \tau) \in Q \times \Sigma^*$

– transitive Hülle:

- $(q', \tau_1) \vdash_{FSA} (q'', \tau_2)$ und $(q'', \tau_2) \vdash_{FSA} (q''', \tau_3)$
 $\Rightarrow (q', \tau_1) \vdash_{FSA} (q''', \tau_3)$ für alle $(q, \tau) \in Q \times \Sigma^*$

Formale Grundlagen von Automaten: Akzeptanz

- Sei $FSA = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ ein (nicht-deterministischer) endlicher Automat und \vdash_{FSA}^* die reflexive und transitive Hülle von \vdash_{FSA} .

Eine Eingabekette ω wird durch den FSA **akzeptiert**, wenn

$$(q_0, \omega) \vdash_{FSA}^* (q, \varepsilon) \text{ für ein } q \in F.$$

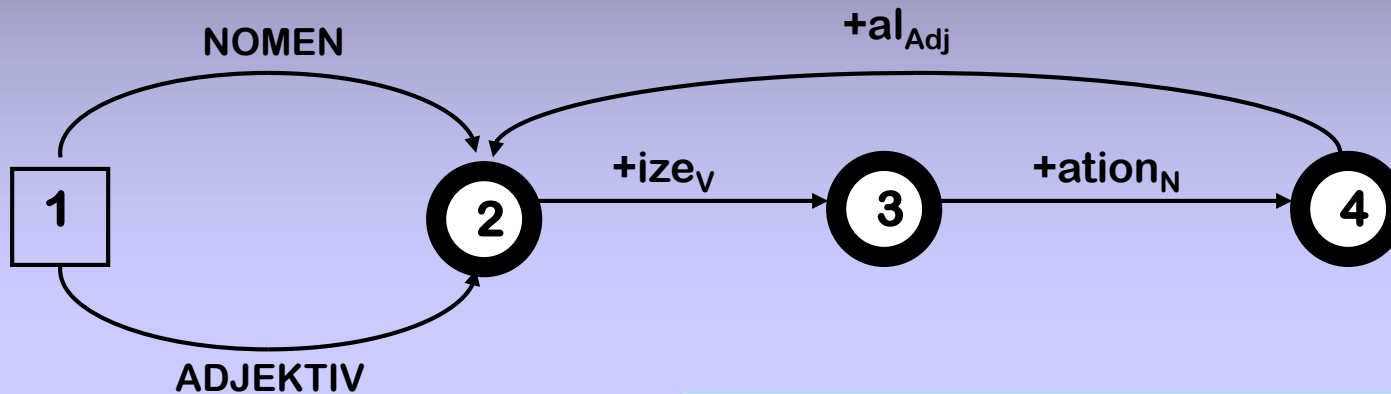
Formale Grundlagen von Automaten: akzeptierte Sprache

- Sei $FSA = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ ein (nicht-deterministischer) endlicher Automat und \vdash_{FSA}^* die reflexive und transitive Hülle von \vdash_{FSA} . Die (**formale**) **Sprache** \mathcal{L}_{FSA} , die durch FSA definiert wird, ist die Menge von Eingabeketten, die vom FSA **akzeptiert** wird:

$$\mathcal{L}_{FSA} := \{ \omega \mid \omega \in \Sigma^*, (q_0, \omega) \vdash_{FSA}^* (q, \varepsilon) \text{ für ein } q \in F \}$$

$$\subseteq \Sigma^*$$

Automat für Dederivation



NOMEN: hospital, motor, category, ...

ADJEKTIV: moral, concrete, tender, ...

n

Anfangszustand

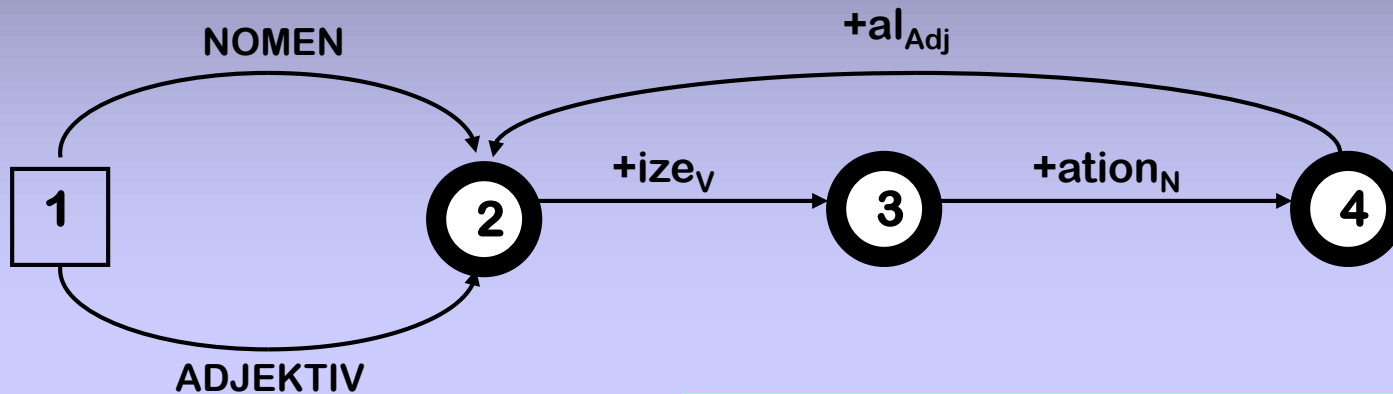
n

möglicher Endzustand

hospital+ize_V+ation_N ∈ \mathcal{L}_{FSA}

?

Automat für Dederivation



NOMEN: hospital, motor, category, ...

ADJEKTIV: moral, concrete, tender, ...

n

Anfangszustand

n

möglicher Endzustand

$hospital+ize_v+ation_N \in \mathcal{L}_{FSA}$!

$\{((1, hospital+ize_v+ation_N), (4, \epsilon))\} \subseteq \vdash^*_{FSA}$;

$((1, hospital+ize_v+ation_N), (4, \epsilon)) \in \vdash^*_{FSA}$

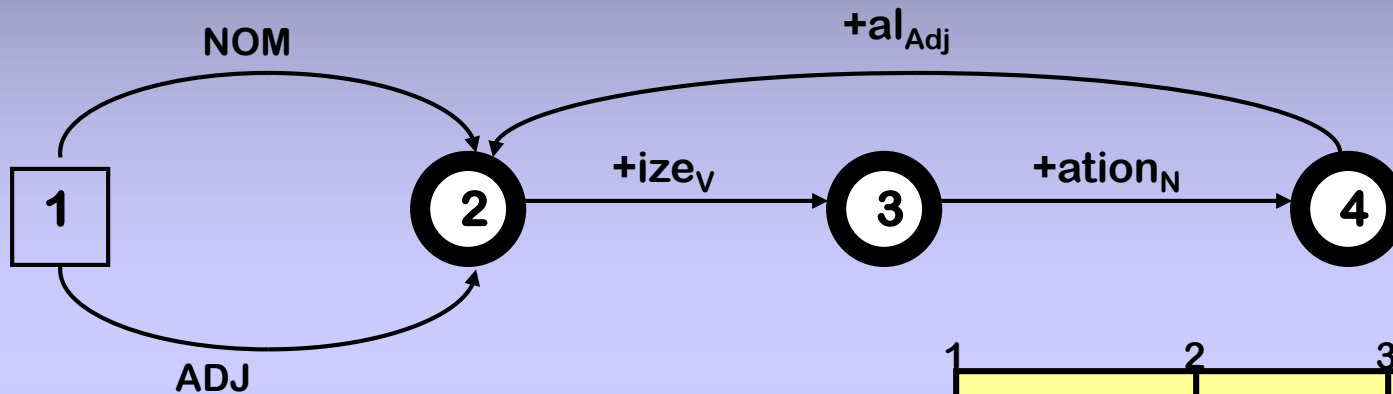
Endlicher Automat

- **Das Verhalten eines FSAs hängt von zwei Arten von Informationen ab:**
 - dem aktuellen Zustand des endlichen Steuerungssystems,
 - der Symbolkette auf dem Eingabeband, die aus dem aktuellen Symbol unter dem Lesekopf und allen folgenden Symbolen rechts vom aktuellen Symbol besteht

Deterministischer FSA- Erkennungsalgorithmus

- **Band** (für die zu testende Kette)
 - in n Zellen aufgeteilt
 - jede Zelle hält ein Symbol der Kette
- **Zustandstranstionstabelle** (2-D Matrix)
 - Zeilen: Zustandsmarken des FSA
 - Spalten: Symbole des Alphabets
 - Zelle: Folgezustand

Automat für Dederivation



1	2	3	4
hospital	+ize _v	+ation _N	ε

NOM: hospital, motor, category, ...

ADJ: moral, concrete, tender, ...

n Anfangszustand

n möglicher Endzustand

Zustand	Eingabe			
	NOM ADJ	+ize _v	+ation _N	+al _{Adj}
1	2	0	0	0
<u>2</u>	0	3	0	0
<u>3</u>	0	0	4	0
<u>4</u>	0	0	0	2

Deterministischer FSA- Erkennungsalgorithmus

Funktion D-Erkennen(\downarrow Band, \downarrow FSA) = „accept“ oder „reject“

Index \Leftarrow Bandanfang

AktualZustand \Leftarrow Anfangszustand des FSA

LOOP

IF Ende der Eingabekette ist erreicht THEN

 IF AktualZustand ist ein Endzustand THEN return „accept“

 ELSE return „reject“

ELSE-IF Zustandstranstionstabelle[AktualZustand, Band(Index)] = 0 THEN

 return „reject“

 ELSE AktualZustand \Leftarrow Zustandstranstionstabelle[AktualZustand, Band(Index)]

 Index \Leftarrow Index + 1

LOOPEND

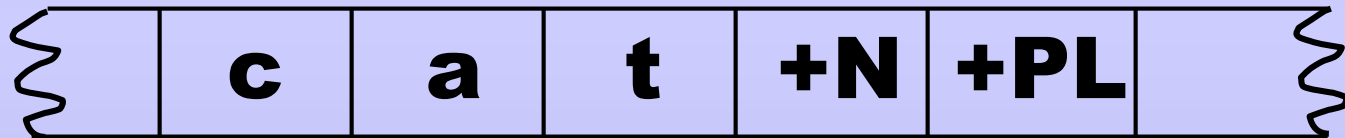
Morphologisches Parsing

- **Lexikon**
 - Liste von Stämmen und Affixen sowie geeigneten morphologischen Merkmalen
- **Morphotaktik**
 - Modell der Ordnung von Morphemklassen in flektierten Wortformen
 - Beispiel: Pluralsuffix nach Stamm
- **Orthographieregeln**
 - Regeln zur Beschreibung von Kombinationseffekten bei Morphemen
 - Beispiel aus dem Englischen: $y \mapsto ie$

Zwei-Ebenen-Morphologie

- **Lexikalische Ebene**

- Wortrepräsentation als Konkatenation von Morphemen

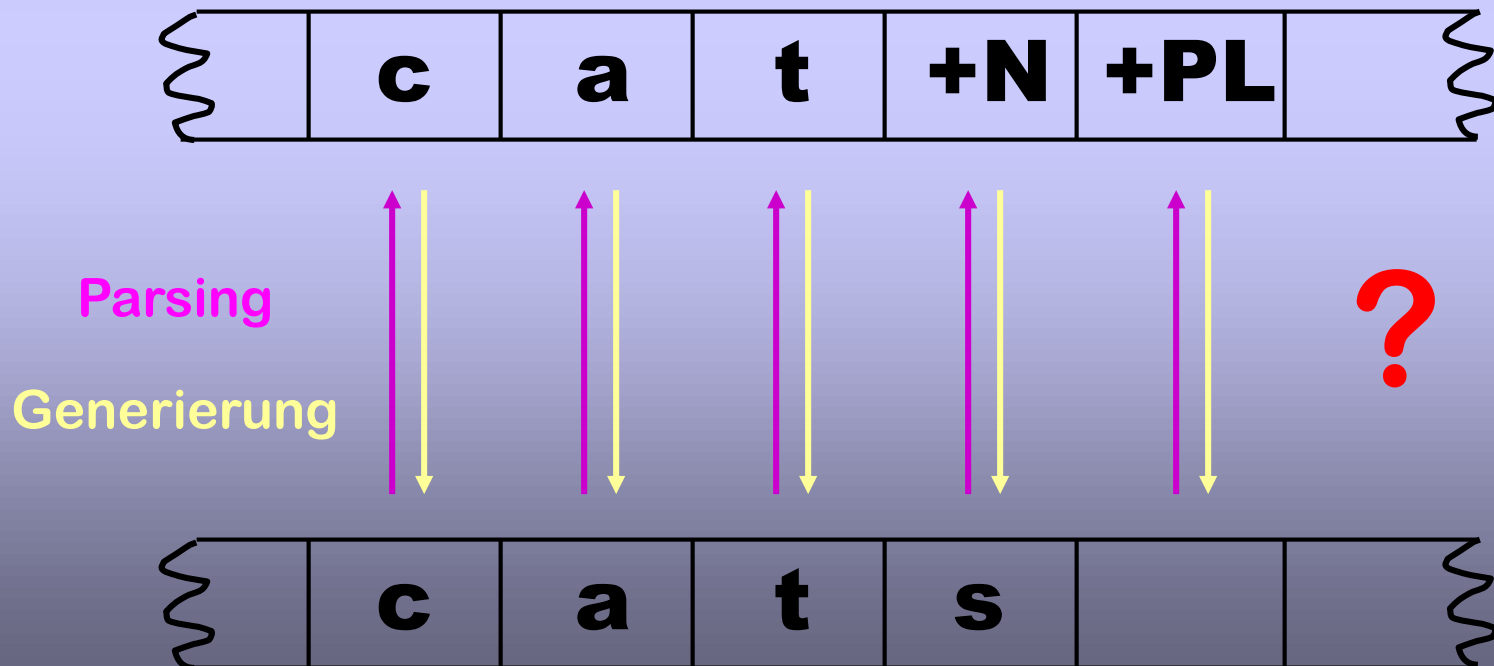


- **Oberflächenebene**

- Wortrepräsentation als Abfolge von Buchstaben



Zwei-Ebenen-Morphologie



Erinnerung: endlicher Automat

- Ein (nicht-deterministischer) **endlicher Automat** ist ein 5-Tupel $(Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ mit
 - **Q**: endliche Menge von (Steuerungs-)Zuständen
 $q_0, q_1, q_2, \dots, q_n$
 - **Σ** : endliches Eingabealphabet
 - **δ** : Zustandsübergangsfunktion, die das Steuerungsverhalten des FSA determiniert
$$\delta : Q \times \Sigma \mapsto \wp(Q)$$
 - **$q_0 \in Q$** : der ausgezeichnete Startzustand
 - **$F \subseteq Q$** : Menge der ausgezeichneten Endzustände

Formale Grundlagen von Automaten: endlicher Transduktor

- Ein (nicht-deterministischer) **endlicher Transduktor** ist ein 5-Tupel $(Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ mit
 - Q : endliche Menge von (Steuerungs-)Zuständen
 - $\Sigma \subseteq I \times O$: endliches Alphabet mit komplexen Symbolen, die aus Eingabe-Ausgabe-Paaren $i:o$ bestehen, $i \in I$ (Eingabealphabet), $o \in O$ (Ausgabealphabet), beide inkl. ε
 - δ : Zustandsübergangsfunktion $\delta(q, i:o)$, die das Steuerungsverhalten des FST determiniert

$$\delta : Q \times \Sigma \mapsto \wp(Q)$$

- $q_0 \in Q$: der ausgezeichnete Startzustand
- $F \subseteq Q$: Menge der ausgezeichneten Endzustände

Formale Grundlagen von Automaten: endlicher Transduktor

- Ein (nicht-deterministischer) **endlicher Transduktor** ist ein **6-Tupel** $(Q, \Sigma, \Delta, \delta, q_0, F)$ mit
 - Q : endliche Menge von (Steuerungs-)Zuständen
 - Σ : endliches Eingabealphabet (inkl. ε)
 - Δ : **endliches Ausgabealphabet** (inkl. ε)
 - δ : Zustandsübergangsfunktion, die das Steuerungsverhalten des FST determiniert
$$\delta : Q \times \Sigma \mapsto \wp(Q \times \Delta^*)$$
 - $q_0 \in Q$: der ausgezeichnete Startzustand
 - $F \subseteq Q$: Menge der ausgezeichneten Endzustände

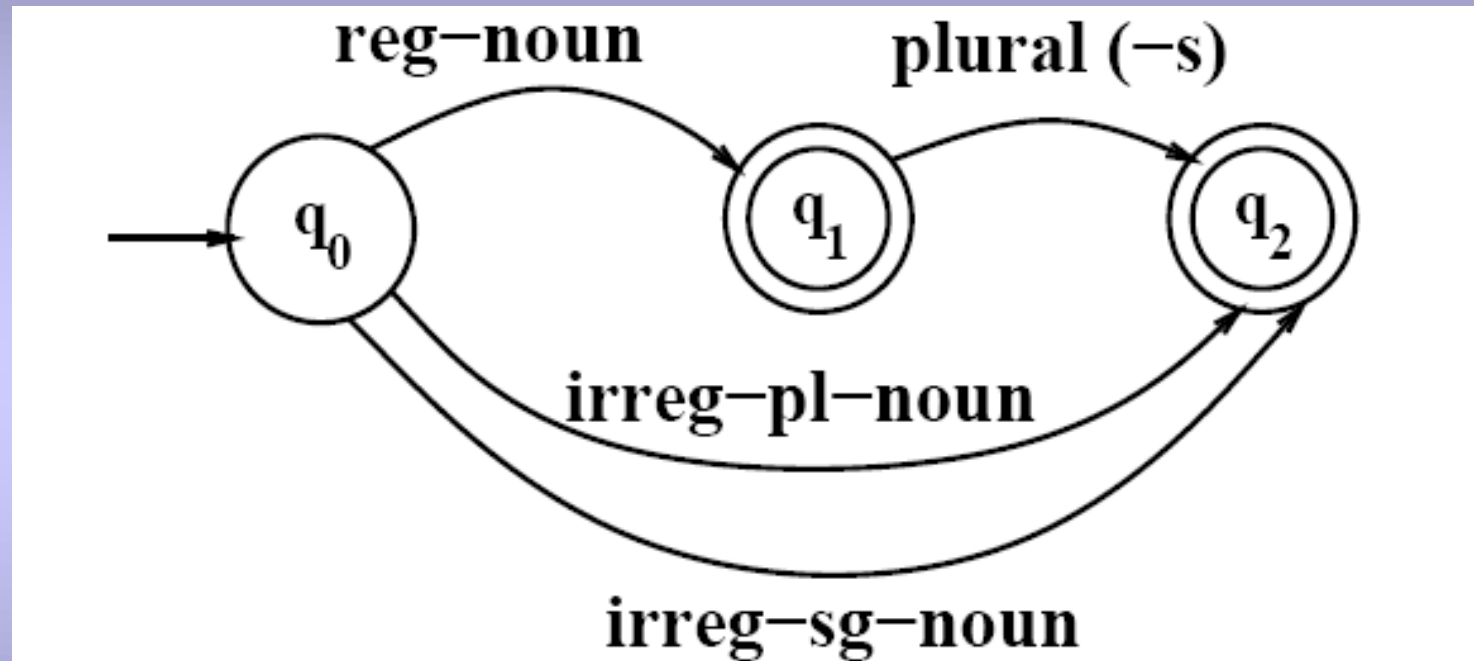
Akzeptierte Sprache: FSA *vs.* FST

- Ein FSA akzeptiert eine Sprache, die über einem Alphabet *einzelner* Symbole spezifiziert ist
- Ein FST akzeptiert eine Sprache, die über *Paaren* von Symbolen spezifiziert ist. Diese werden auch *zulässige Paare* (*feasible pairs*) genannt.

Konventionen zur Zwei-Ebenen-Morphologie

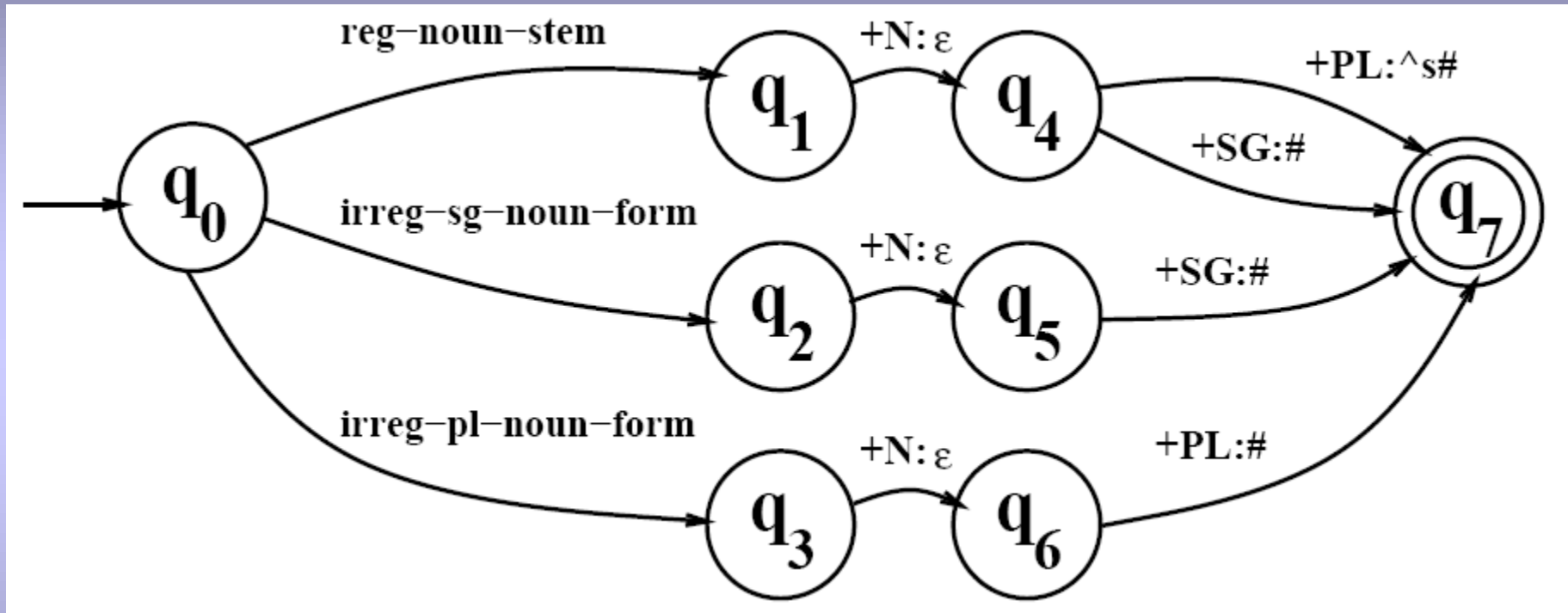
- Zeichenpaare für FSTs ($\alpha:\gamma$) werden so kodiert, dass α das Zeichen auf dem Lexikalischen Band und γ das auf dem Oberflächenband bezeichnet.
- Identische Zeichenpaare für FSTs ($\alpha:\alpha$) heißen Default-Paare und werden auch kurz als α notiert.
- @ (oder =) steht für ein beliebiges Symbol
- ^ ist das Morphembegrenzungssymbol
- # ist das Wortbegrenzungssymbol

FSA für Flexionsmorphologie: Englische Nomen



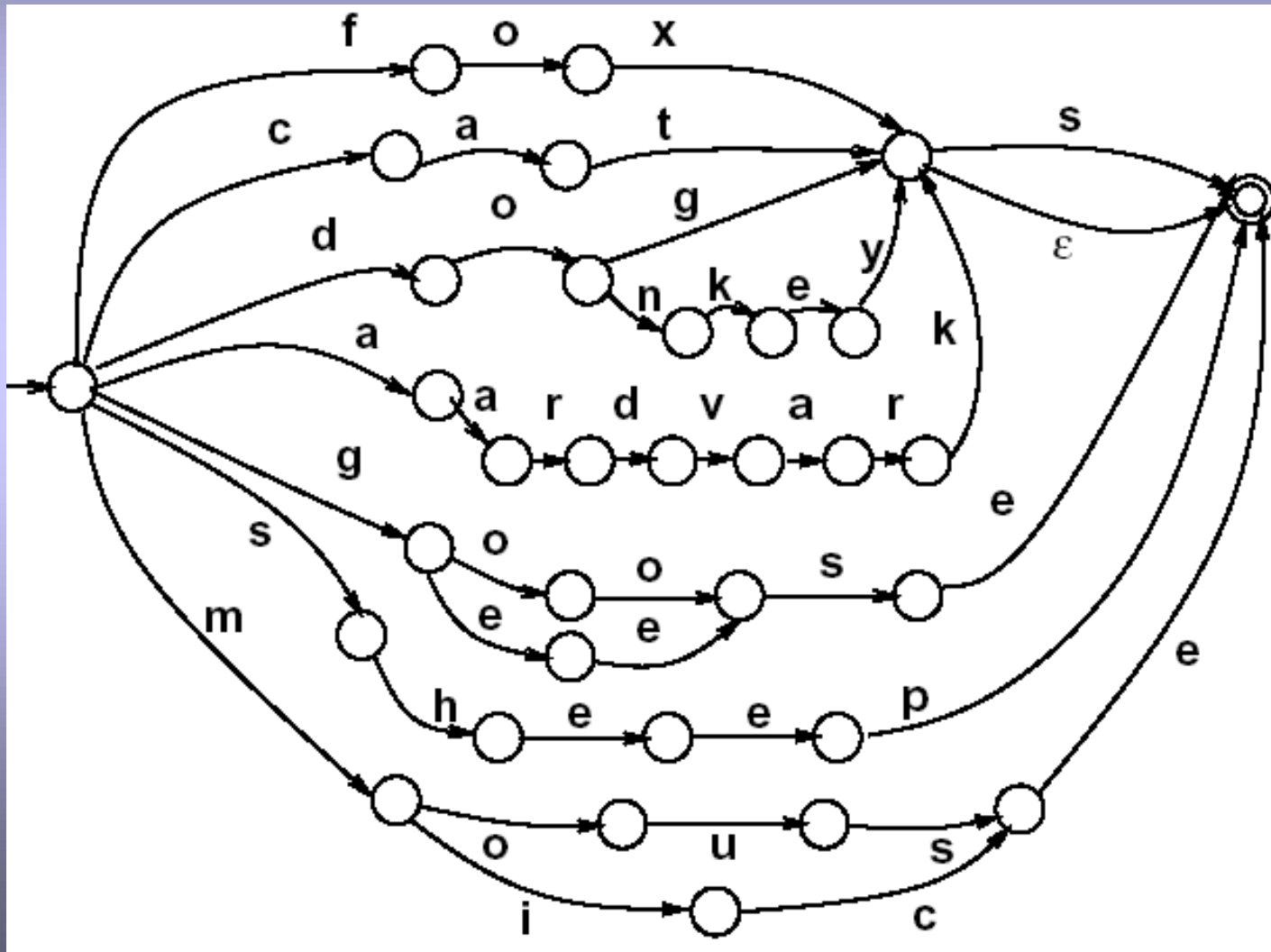
reg-noun	irreg-pl-noun	irreg-sg-noun	plural
aardvark cat dog fox	geese sheep mice	goose sheep mouse	-s

FST für Flexionsmorphologie: Englische Nomen II

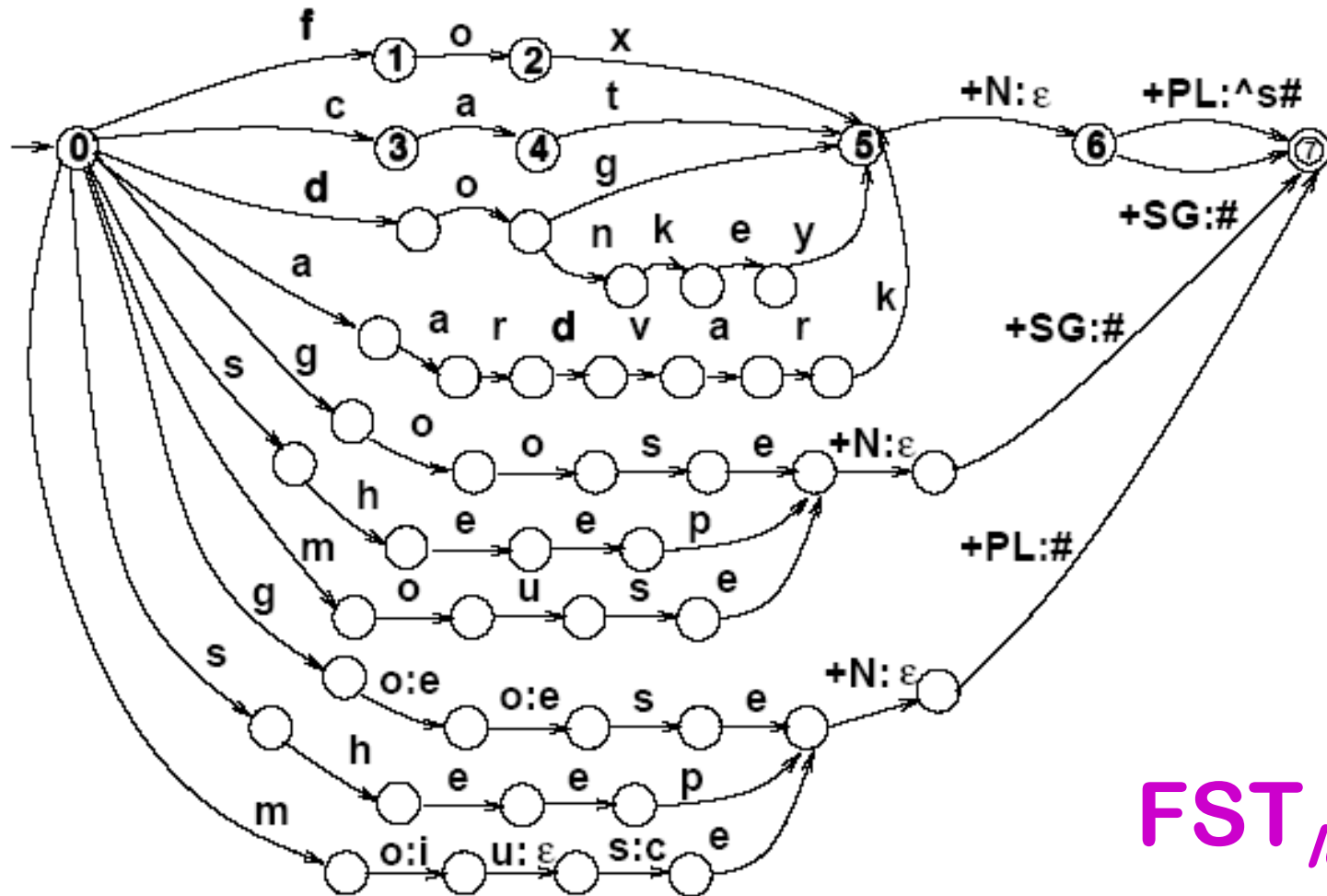


reg-noun	irreg-pl-noun	irreg-sg-noun
aardvark	g o:e o:e s e	goose
cat	sheep	sheep
dog	m o:i u:ε s:c e	mouse
fox		

FSA as Erkennen mit integrierten Sublexika als TRIE



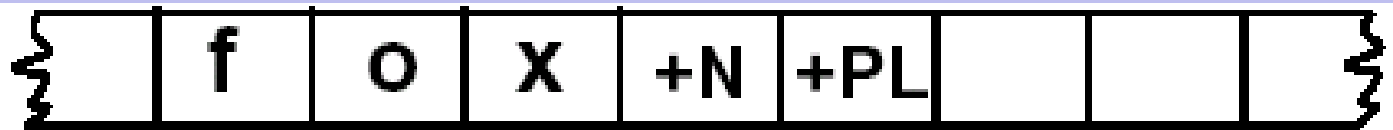
FSTs als Wort-Parser mit Fortsetzungslexikon als TRIE



FST_{lex}

Lexikalische und Intermediäre Bänder

Lexical



Intermediate



Problem:

Orthographische Regeln:

FST würde korrekte Form *foxes* zurückweisen,
aber inkorrekte Form *foxs* akzeptieren

Einige englische Orthographieregeln

Für jede Regel
einen Transduktor!

Name	Regelbeschreibung	Beispiel
Consonant Doubling	1-letter consonant doubled before <i>-ing/-ed</i>	beg/begging
E-deletion	Silent <i>e</i> dropped before <i>-ing</i> and <i>-ed</i>	make/making
E-insertion	<i>e</i> added after <i>s,z,x,ch,sh</i> before <i>s</i>	watch/watches
Y-replacement	<i>-y</i> changes to <i>-ie</i> before <i>-s</i> , to <i>-i</i> before <i>-ed</i>	try/tries, try/tried
K-insertion	verbs ending with vowel + <i>-c</i> add <i>-k</i>	panic/panicked

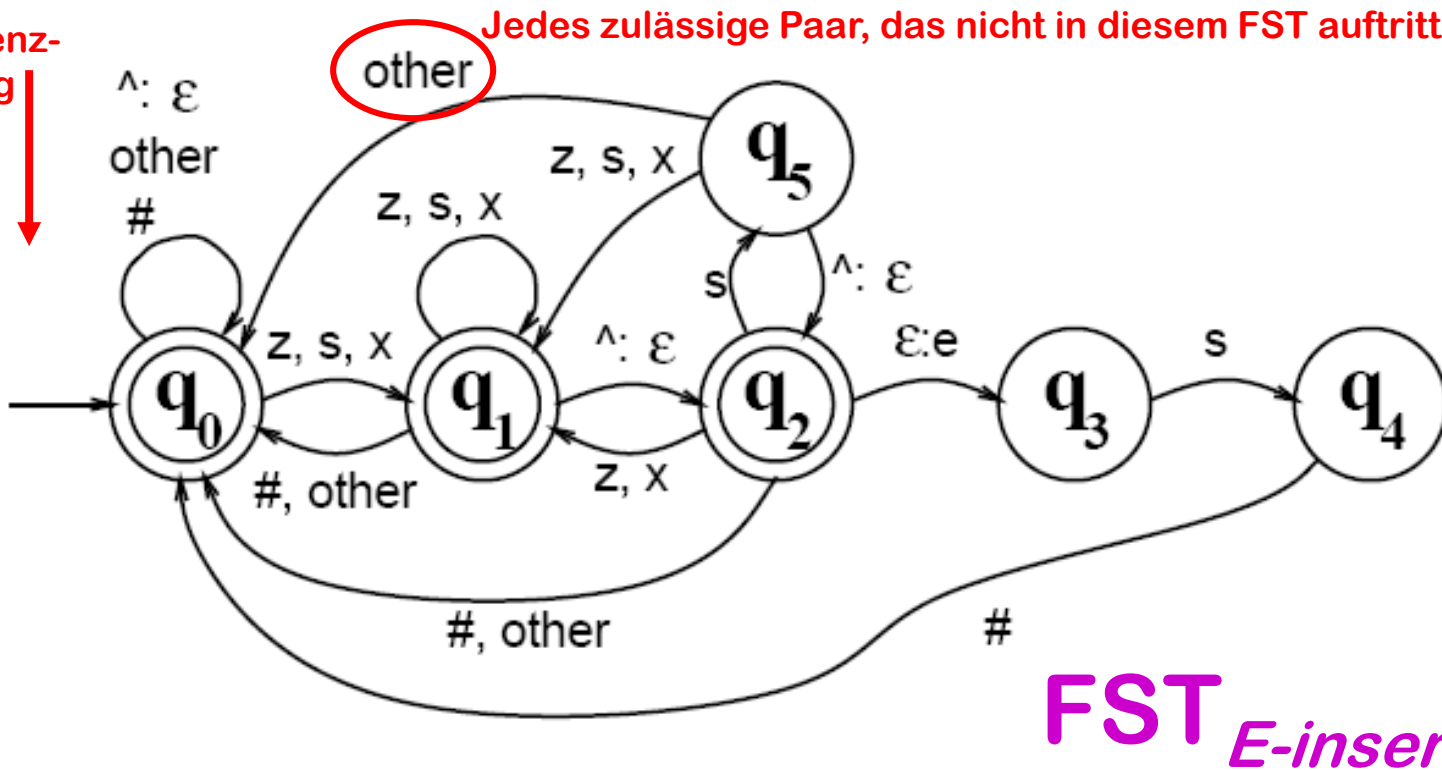
Lexical { f | o | x | +N | +PL | | | }

Intermediate { f | o | x | ^ | s | # | | }

Surface { f | o | x | e | s | | | }

Intermediär-Oberflächenband- Transduktor (E-Insertion)

Präzedenz-
Ordnung



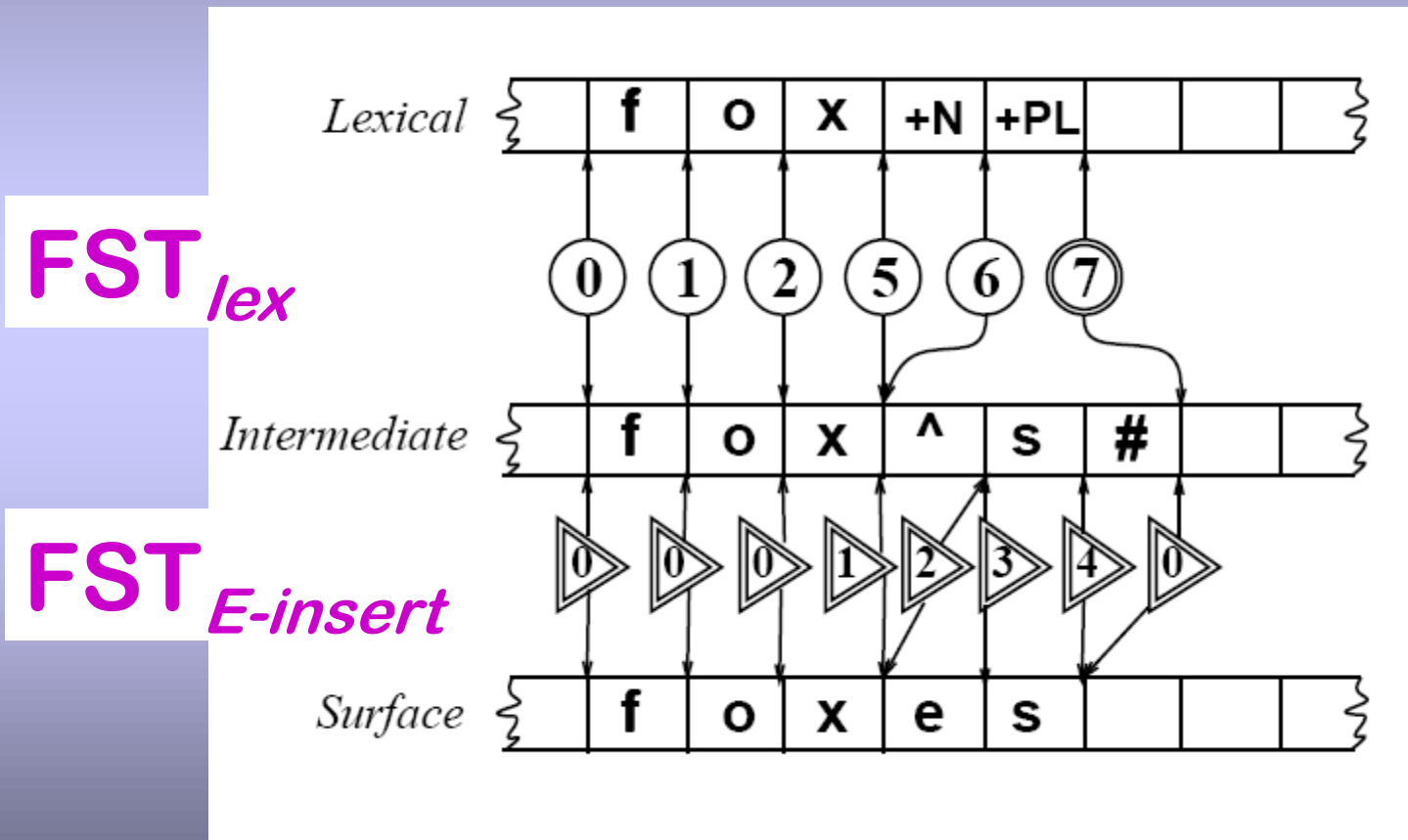
„Füge ein „e“ auf dem Oberflächenband ein, wenn auf dem Lexikalischen Band ein Morphem auf „x“, „s“ oder „z“ endet und das nächste Morphem ein „s“ ist.“

Zustandstransitionstabelle für E-Insertion

State \ Input	s : s	x : X	z : Z	^ : ε	ε : e	#	other
q_0 :	1	1	1	0	-	0	0
q_1 :	1	1	1	2	-	0	0
q_2 :	5	1	1	0	3	0	0
q_3	4	-	-	-	-	-	-
q_4	-	-	-	-	-	0	-
q_5	1	1	1	2	-	-	0

Explizite Markierung illegaler Transitionen

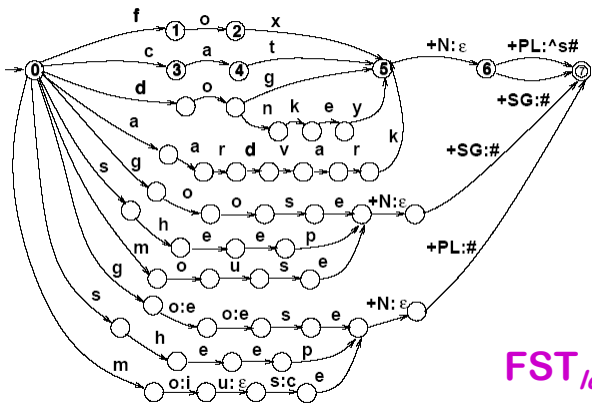
FST-Akzeptanz-Beispiel



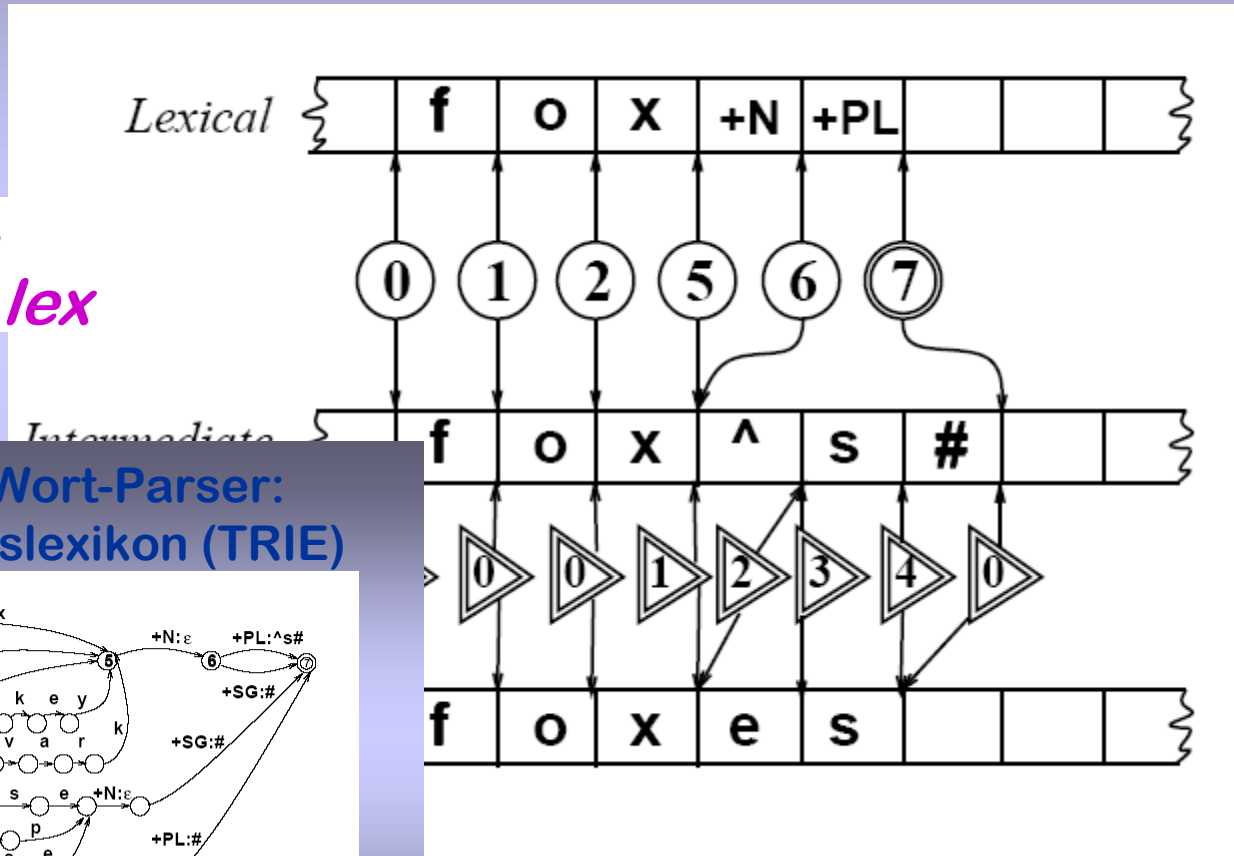
FST-Akzeptanz-Beispiel

FST_{lex}

FSTs als Wort-Parser:
Fortsetzungslexikon (TRIE)

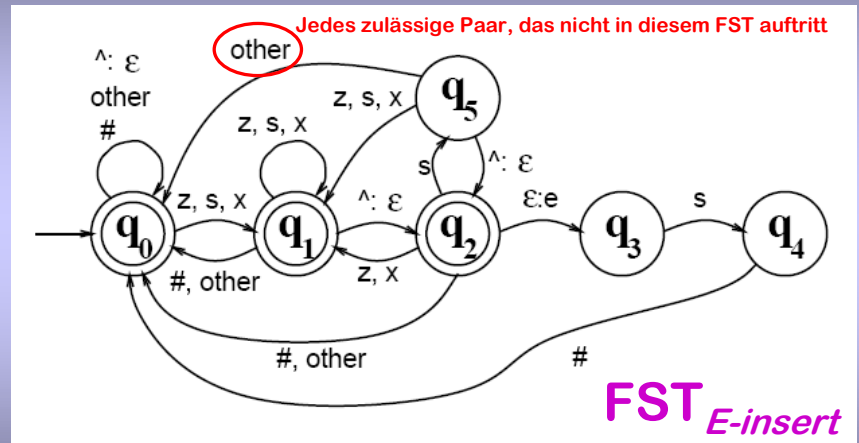


FST_{lex}



Intermediär-Oberflächenband-Transduktor (E-Insertion)

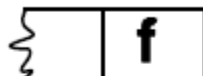
FST-Akzeptanz



„Füge ein „e“ auf dem Oberflächenband ein, wenn auf dem Lexikalischen Band ein Morphem auf „x“, „s“ oder „z“ endet und das nächste Morphem ein „s“ ist.“

FST_{lex}

Lexical **f**



Intermediate

f o x ^ s #

FST E-insert



Surface

f o x e s

Zwei-Ebenen-Morphologie: Parser/Generator

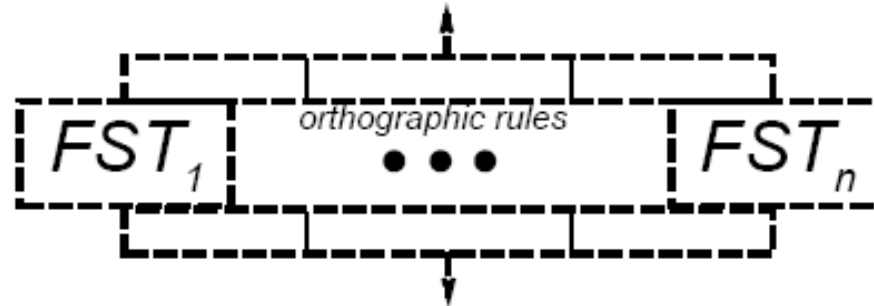
FST_{lex}

Lexical { f o x +N +PL }



Intermediate { f o x ^ s }

FST_{E-insert}



Surface { f o x e s }

Fazit

- Zwei-Ebenen-Morphologie (ZEM) ist das dominierende Modell der automatischen morphologischen Analyse (falls eine umfassende, „tiefe“ morphologische Analyse nötig ist)
- ZEM-Systeme gibt es für eine Fülle von Sprachen, aber für das Deutsche ist dieses Modell problematisch (nicht-konkatenative Morphologie, z.B. Umlautung)
- ZEM-Systeme sind überschaubar groß
- Online-Version PC-KIMMO

<https://software.sil.org/pc-kimmo/>