Semantik in CCG

Kilian Evang, Christian Wurm

Düsseldorf, 8.12.2022

Einleitung

Bisher

- Wörter und Konstituenten haben rein syntaktische Kategorien
- Semantik ignoriert

Heute

- Wörter und Konstituenten haben syntaktische Kategorien *und semantische Kategorien* (Lambda-Terme)
- Prinzip der Typentransparenz
- Semantische Operationen folgen syntaktischen
- Erlaubt uns, die Bedeutung von Sätzen zu errechnen

Beispiel: Ableitung mit Semantik

$$
\dfrac{\dfrac{\text{Mary}}{\mathrm{NP} : \mathit{mary}} \quad \dfrac{\dfrac{\text{kicks}}{(\mathrm{S}\backslash\mathrm{NP})/\mathrm{NP} : \lambda x.\lambda y.\mathit{kicks}(y,x)} \quad \dfrac{\text{John}}{\mathrm{NP} : \mathit{john}}}{\mathrm{S}\backslash\mathrm{NP} : \lambda y.\mathit{kicks}(y,\mathit{john})} >^0}{\mathrm{S} : \mathit{kicks}(\mathit{mary},\mathit{john})} <^0
$$

Applikation mit Semantik

$$X/Y : f \quad Y : a \Rightarrow X : f(a) \qquad (>)$$
$$Y : a \quad X\backslash Y : f \Rightarrow X : f(a) \qquad (<)$$

Komposition mit Semantik

$$
\begin{array}{lllr}
X/Y : f & Y/Z : g & \Rightarrow X/Z : \lambda x.f(g(x)) & (> \mathbf{B}) \\
X/Y : f & Y\backslash Z : g & \Rightarrow X\backslash Z : \lambda x.f(g(x)) & (> \mathbf{B}_\times) \\
Y\backslash Z : g & X\backslash Y : f & \Rightarrow X\backslash Z : \lambda x.f(g(x)) & (< \mathbf{B}) \\
Y/Z : g & X\backslash Y : f & \Rightarrow X/Z : \lambda x.f(g(x)) & (< \mathbf{B}_\times)
\end{array}
$$

(Plus generalisierte Versionen mit zusätzlichen Argumenten.)

Typenhebung mit Semantik

$$X : a \Rightarrow \mathrm{T}/(\mathrm{T}\backslash X) : \lambda f.f(a) \quad (> \mathbf{T})$$
$$X : a \Rightarrow \mathrm{T}\backslash(\mathrm{T}/X) : \lambda f.f(a) \quad (< \mathbf{T})$$

Substitution mit Semantik

$$
\begin{array}{llr}
(X/Y)/Z : f \quad Y/Z : g & \Rightarrow X/Z : \lambda x.f(x)(g(x)) & (> \mathbf{S}) \\
(X/Y)\backslash Z : f \quad Y\backslash Z : g & \Rightarrow X\backslash Z : \lambda x.f(x)(g(x)) & (> \mathbf{S}_{\times}) \\
Y\backslash Z : g \quad (X\backslash Y)\backslash Z : f & \Rightarrow X\backslash Z : \lambda x.f(x)(g(x)) & (< \mathbf{S}) \\
Y/Z : g \quad (X\backslash Y)/Z : f & \Rightarrow X/Z : \lambda x.f(x)(g(x)) & (< \mathbf{S}_{\times})
\end{array}
$$

(Plus generalisierte Versionen mit zusätzlichen Argumenten.)

Koordination mit Semantik

$$X : f \quad \mathrm{CONJ} \quad X : g \Rightarrow X : \lambda x.f(x) \wedge g(x) \quad (< \boldsymbol{\Phi} >)$$

Beispiel: Koordination von Funktoren

$$
\begin{array}{ccccc}
\text{Mary} & \text{sings} & \text{and} & \text{dances} & \\
\hline
\mathrm{NP} & \mathrm{S}\backslash\mathrm{NP} & \mathrm{CONJ} & \mathrm{S}\backslash\mathrm{NP} & \\
mary & \lambda x.sings(x) & & \lambda x.dances(x) & \\
\cline{2-4}
& \multicolumn{3}{c}{\mathrm{S}\backslash\mathrm{NP}} & <\mathbf{\Phi}> \\
& \multicolumn{3}{c}{\lambda x.sings(x) \wedge dances(x)} & \\
\cline{1-4}
\multicolumn{4}{c}{\mathrm{S}} & <^{0} \\
\multicolumn{4}{c}{sings(mary) \wedge dances(mary)} &
\end{array}
$$

Beispiel: Koordination von Argumenten

$$
\begin{array}{cccc}
\text{Mary} & \text{and} & \text{John} & \text{sing} \\
\hline
\mathrm{NP} & \mathrm{CONJ} & \mathrm{NP} & \mathrm{S} \backslash \mathrm{NP} \\
\mathit{mary} & & \mathit{john} & \lambda x.\mathit{sing}(x) \\
\cline{1-1}\cline{3-3}
\mathrm{S}/(\mathrm{S}\backslash\mathrm{NP}) \quad T^{>} & & \mathrm{S}/(\mathrm{S}\backslash\mathrm{NP}) \quad T^{>} & \\
\lambda f.f(\mathit{mary}) & & \lambda f.f(\mathit{john}) & \\
\cline{1-3}
\multicolumn{3}{c}{\mathrm{S}/(\mathrm{S}\backslash\mathrm{NP}) \quad <\boldsymbol{\Phi}>} & \\
\multicolumn{3}{c}{\lambda h.h(\mathit{mary}) \wedge h(\mathit{john})} & \\
\hline
\multicolumn{4}{c}{\mathrm{S} \quad >^{0}} \\
\multicolumn{4}{c}{\mathit{sing}(\mathit{mary}) \wedge \mathit{sing}(\mathit{john})}
\end{array}
$$

Beispiel: Negation

$$
\begin{array}{cccc}
\text{I} & \text{do} & \text{not} & \text{mind} \\
\hline
\mathrm{NP} & (\mathrm{S[dcl]} \backslash \mathrm{NP})/(\mathrm{S[b]} \backslash \mathrm{NP}) & (\mathrm{S} \backslash \mathrm{NP}) \backslash (\mathrm{S} \backslash \mathrm{NP}) & \mathrm{S[b]} \backslash \mathrm{NP} \\
i & \lambda a.a & \lambda f.\lambda a.\neg f(a) & \lambda x.mind(x)
\end{array}
$$

$$
\frac{(\mathrm{S[dcl]} \backslash \mathrm{NP})/(\mathrm{S[b]} \backslash \mathrm{NP}) \quad \lambda a.a \qquad (\mathrm{S} \backslash \mathrm{NP}) \backslash (\mathrm{S} \backslash \mathrm{NP}) \quad \lambda f.\lambda a.\neg f(a)}{(\mathrm{S[dcl]} \backslash \mathrm{NP})/(\mathrm{S[b]} \backslash \mathrm{NP}) \quad \lambda f.\lambda a.\neg f(a)} <^{1}_{\times}
$$

$$
\frac{(\mathrm{S[dcl]} \backslash \mathrm{NP})/(\mathrm{S[b]} \backslash \mathrm{NP}) \quad \lambda f.\lambda a.\neg f(a) \qquad \mathrm{S[b]} \backslash \mathrm{NP} \quad \lambda x.mind(x)}{\mathrm{S[dcl]} \backslash \mathrm{NP} \quad \lambda a.\neg mind(a)} >^{0}
$$

$$
\frac{\mathrm{NP} \quad i \qquad \mathrm{S[dcl]} \backslash \mathrm{NP} \quad \lambda a.\neg mind(a)}{\mathrm{S[dcl]} \quad \neg mind(i)} <^{0}
$$

Skopus (von Quantoren)

(1) Every boy admires some saxophonist

Zwei Lesarten:

(2) $\forall y.boy(y) \rightarrow \exists x.saxophonist(x) \wedge admires(x, y)$

(3) $\exists x.saxophonist(x) \wedge \forall y.boy(y) \rightarrow admires(x, y)$

Lexikoneinträge von Quantoren

$$\text{every} := (\mathrm{T}\,/(\mathrm{T}\,\backslash\,\mathrm{NP}))/\,\mathrm{N} : \lambda p.\lambda q.\forall x.p(x) \rightarrow q(x)$$

$$\text{every} := (\mathrm{T}\,\backslash(\mathrm{T}\,/\,\mathrm{NP}))/\,\mathrm{N} : \lambda p.\lambda q.\ldots.\forall x.p(x) \rightarrow q(x)\ldots$$

$$\text{some} := (\mathrm{T}\,/(\mathrm{T}\,\backslash\,\mathrm{NP}))/\,\mathrm{N} : \lambda p.\lambda q.\exists x.p(x) \wedge q(x)$$

$$\text{some} := (\mathrm{T}\,\backslash(\mathrm{T}\,/\,\mathrm{NP}))/\,\mathrm{N} : \lambda p.\lambda q.\ldots.\exists x.p(x) \wedge q(x)\ldots$$

T kann z.B. S oder S $\backslash$ NP sein. Jedes Argument erfordert eine zusätzliche λ-Abstraktion, dafür stehen die Punkte $\ldots$.

Ableitung mit Oberflächenskopus

$$\begin{array}{ccccc}
\text{Every} & \text{boy} & \text{admires} & \text{some} & \text{saxophonist} \\
\hline
(\mathsf{S}/(\mathsf{S}\backslash\mathsf{NP}))/\mathsf{N} & \mathsf{N} & (\mathsf{S}\backslash\mathsf{NP})/\mathsf{NP} & (\mathsf{IV}\backslash(\mathsf{IV}/\mathsf{NP}))/\mathsf{N} & \mathsf{N} \\
\lambda p.\lambda q.\forall y.p(y) \rightarrow q(y) & \lambda x.boy(x) & \lambda x.\lambda y.admires(x,y) & \lambda p.\lambda q.\lambda y.\exists x.p(x) \wedge q(x)(y) & \lambda x.saxophonist(x)
\end{array}$$

$$\frac{\lambda p.\lambda q.\forall y.p(y) \rightarrow q(y) \quad \lambda x.boy(x)}{\mathsf{S}/(\mathsf{S}\backslash\mathsf{NP}) \qquad \lambda q.\forall y.boy(y) \rightarrow q(y)}>$$

$$\frac{\lambda p.\lambda q.\lambda y.\exists x.p(x) \wedge q(x)(y) \quad \lambda x.saxophonist(x)}{\mathsf{IV}\backslash(\mathsf{IV}/\mathsf{NP}) \qquad \lambda q.\lambda y.\exists x.saxophonist(x) \wedge q(x)(y)}>$$

$$\frac{\lambda x.\lambda y.admires(x,y) \quad \lambda q.\lambda y.\exists x.saxophonist(x) \wedge q(x)(y)}{\mathsf{S}\backslash\mathsf{NP} \qquad \lambda y.\exists x.saxophonist(x) \wedge admires(x,y)}<$$

$$\frac{\lambda q.\forall y.boy(y) \rightarrow q(y) \quad \lambda y.\exists x.saxophonist(x) \wedge admires(x,y)}{\mathsf{S} \qquad \forall y.boy(y) \rightarrow \exists x.saxophonist(x) \wedge admires(x,y)}>$$

Ableitung mit inversem Skopus

Every	boy	admires	some	saxophonist
$(S/(S\backslash NP))/N$	N	$(S\backslash NP)/NP$	$(S\backslash(S/NP))/N$	N
$\lambda p.\lambda q.\forall y.p(y) \to q(y)$	$\lambda x.boy(x)$	$\lambda x.\lambda y.admires(x,y)$	$\lambda p.\lambda q.\exists x.p(x) \wedge q(x)$	$\lambda x.saxophonist(x)$

$$\frac{\text{Every} \quad \text{boy}}{S/(S\backslash NP) \quad \lambda q.\forall y.boy(y) \to q(y)} >$$

$$\frac{\text{some} \quad \text{saxophonist}}{S\backslash(S/NP) \quad \lambda q.\exists x.saxophonist(x) \wedge q(x)} >$$

$$\frac{S/(S\backslash NP) \quad (S\backslash NP)/NP}{S/NP \quad \lambda x.\forall y.boy(y) \to admires(x,y)} >\mathbf{B}$$

$$\frac{S/NP \quad S\backslash(S/NP)}{S \quad \exists x.saxophonist(x) \wedge \forall y.boy(y) \to admires(x,y)} <$$

Problem

- Quantorenskopus = Derivationeller Skopus
- Funktioniert in unserem Beispiel, aber:

(4) Every boy admires, and every girl detests, some saxophonist

- Lesart mit Oberflächenskopus ist möglich, aber wir können sie nicht herleiten
- Lösung in Steedman (2000): Existenzquantor nicht verwenden, stattdessen Skolemisierungsoperation

Lexikoneinträge von Quantoren (revidiert)

$$\text{every} := (\mathrm{S}\,/(\mathrm{S}\setminus\mathrm{NP}))/\,\mathrm{N} : \lambda p.\lambda q.\forall x.p(x) \rightarrow q(x)$$
$$\text{every} := (\mathrm{IV}\setminus(\mathrm{IV}\,/\,\mathrm{NP}))/\,\mathrm{N} : \lambda p.\lambda q.\forall x.p(x) \rightarrow q(x)$$
$$\text{some} := (\mathrm{S}\,/(\mathrm{S}\setminus\mathrm{NP}))/\,\mathrm{N} : \lambda p.\lambda q.q(arb(p))$$
$$\text{some} := (\mathrm{IV}\setminus(\mathrm{IV}\,/\,\mathrm{NP}))/\,\mathrm{N} : \lambda p.\lambda q.q(arb(p))$$

Die Operation der *Skolemisierung* ersetzt $arb(p)$ durch einen Skolem-Term, dessen Wert von allen universell quantifizierten Variablen im Skopus abhängt.

Ableitung mit Oberflächenskopus

$$\dfrac{\dfrac{\text{Every boy admires and every girl detests}}{\begin{matrix}\mathrm{S}\,/\,\mathrm{NP} \\ \lambda x.(\forall y.boy(y) \rightarrow admires(x,y)) \wedge (\forall z.girl(z) \rightarrow detests(x,z))\end{matrix}} \quad \dfrac{\text{some saxophonist}}{\begin{matrix}\mathrm{S}\backslash(\mathrm{S}\,/\,\mathrm{NP}) \\ \lambda q.q(arb(sax))\end{matrix}}}{\begin{matrix}\mathrm{S} \\ (\forall y.boy(y) \rightarrow admires(arb(sax))y) \wedge (\forall z.girl(z) \rightarrow detests(arb(sax))z)\end{matrix}}<$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$\begin{matrix}\mathrm{S} \\ (\forall y.boy(y) \rightarrow admires(sk_{sax_1}(y))(y)) \wedge (\forall z.girl(z) \rightarrow detests(sk_{sax_2}(z))(z))\end{matrix}$$

Ableitung mit inversem Skopus

$$\dfrac{\dfrac{\text{Every boy admires and every girl detests}}{\begin{array}{c}\mathrm{S}/\mathrm{NP}\\ \lambda x.(\forall y.boy(y)\rightarrow admires(x,y))\wedge(\forall z.girl(z)\rightarrow detests(x,z))\end{array}} \quad \dfrac{\dfrac{\text{some saxophonist}}{\begin{array}{c}\mathrm{S}\backslash(\mathrm{S}/\mathrm{NP})\\ \lambda q.q(arb(sax))\end{array}}}{\begin{array}{c}\mathrm{S}\backslash(\mathrm{S}/\mathrm{NP})\\ \lambda q.q(sk_{sax})\end{array}}}{\begin{array}{c}\mathrm{S}\\ (\forall y.boy(y)\rightarrow admires(sk_{sax},y))\wedge(\forall z.girl(z)\rightarrow detests(sk_{sax},z))\end{array}}<$$

Discourse Representation Theory

- Bedeutungsrepräsentationssprache
- In den 1980ern von Hans Kamp entwickelt (Kamp, 1981; Kamp and Reyle, 1993)
- Viele Erweiterungen
- Viele Varianten von DRT können in Prädikatenlogik übersetzt werden (wichtig für automatisches Beweisen)
- Vorteile von DRT gegenüber Prädikatenlogik:
  - Repräsentiert nicht nur *content*, sondern auch *context*: bereits in DRT übersetzte Teildiskurse helfen dabei, folgende anaphorische Ausdrücke zu interpretieren
  - Leichter lesbar
  - Leicht erweiterbar (z.B. Diskursstruktur, Präsuppositionen und Implikaturen...)

Beispiel

A farmer owns a donkey.

Beispiel 1

A farmer owns a donkey.

x y
farmer(x) donkey(y) owns(x, y)

Beispiel 1

A farmer owns a donkey. He beats it.

x y
farmer(x) donkey(y) owns(x, y)

Beispiel 1

A farmer owns a donkey. He beats it.

x y
farmer(x) donkey(y) owns(x, y) beat(x, y)

Beispiel 2

Every farmer who owns a donkey

Beispiel 2

Every farmer who owns a donkey

x y

farmer(x)
donkey(y)
owns(x, y)

$\Rightarrow$

Beispiel 2

Every farmer who owns a donkey beats it.

$$\begin{array}{|l|}\hline \\ \hline \begin{array}{|l|}\hline \text{x y} \\ \hline \text{farmer(x)} \\ \text{donkey(y)} \\ \text{owns(x, y)} \\ \hline \end{array} \Rightarrow \begin{array}{|c|}\hline \ \\ \hline \ \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array}$$

Beispiel 2

Every farmer who owns a donkey beats it.

$$\begin{array}{|l|}\hline \\ \hline \begin{array}{|l|}\hline \text{x y} \\ \hline \text{farmer(x)} \\ \text{donkey(y)} \\ \text{owns(x, y)} \\ \hline \end{array} \Rightarrow \begin{array}{|l|}\hline \\ \hline \text{beats(x,y)} \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array}$$

CCG und DRT

- Bos (2009) entwickelt ein CCG-Lexikon, mit dem DRSen (Discourse Representation Structures) kompositionell abgeleitet werden können
- Grundlage für die Groningen Meaning Bank (Basile et al., 2012; Bos et al., 2017) und die Parallel Meaning Bank (Abzianidze et al., 2017) – Thema der nächsten Sitzung
- Im Folgenden einige Beispiel für die Einträge dieses Lexikons: Wörter, syntaktische Kategorien, semantische Typen und λ-DRSen

Die Kategorie N

$$\text{squirrel} := \mathrm{N} : e \to t : \lambda x.\begin{array}{|c|}\hline \\ \hline \text{squirrel(x)} \\ \hline \end{array}$$

$$\text{red} := \mathrm{N}\,/\,\mathrm{N} : (e \to t) \to (e \to t) : \lambda p.\lambda x.\begin{array}{|c|}\hline \\ \hline \text{red(x)} \\ \hline \end{array}; (p@x))$$

Die Kategorie NP

$$\text{someone} := \mathrm{NP} : (e \to t) \to t : \lambda p. \begin{array}{|l|}\hline \mathrm{x} \\ \hline \mathrm{person(x)} \\ \hline \end{array} ; p(x)$$

$$\text{some} := \mathrm{NP} \,/\, \mathrm{N} : (e \to t) \to ((e \to t) \to t) : \lambda p.\lambda q.(\begin{array}{|c|}\hline \mathrm{x} \\ \hline \\ \hline \end{array} ; (p(x); q(x)))$$

$$\text{every} := \mathrm{NP} \,/\, \mathrm{N} : (e \to t) \to ((e \to t) \to t) : \lambda p.\lambda q. \begin{array}{|l|}\hline \\ \hline \begin{array}{|c|}\hline \mathrm{x} \\ \hline \\ \hline \end{array} ; \mathrm{p(x)} \Rightarrow \mathrm{q(x)} \\ \hline \end{array}$$

$$\text{the} := \mathrm{NP} \,/\, \mathrm{N} : (e \to t) \to ((e \to t) \to t) : \lambda p.\lambda q.(\begin{array}{|c|}\hline \mathrm{x} \\ \hline \\ \hline \end{array} ; (p(x) * q(x)))$$

Die Kategorie S

$$\text{smoked} := \text{S[dcl]} \backslash \text{NP} : ((e \to t) \to t) \to ((e \to t) \to t) : \lambda n.\lambda p.n(\lambda x.(\begin{array}{|l|}\hline \text{e} \\ \hline \text{smoke(e)} \\ \text{agent(e,x)} \\ \hline \end{array}; (p(e))))$$

Beispiel

A: NP / N

$$\lambda p.\lambda q.(\begin{array}{|c|}\hline \mathrm{x} \\ \hline \\ \hline\end{array}; (p(x); q(x)))$$

red: N / N

$$\lambda p.\lambda x.\begin{array}{|l|}\hline \\ \hline \mathrm{red(x)} \\ \hline\end{array}; (p@x))$$

squirrel: N

$$\lambda x.\begin{array}{|l|}\hline \\ \hline \mathrm{squirrel(x)} \\ \hline\end{array}$$

smoked: S[dcl]\ NP

$$\lambda n.\lambda p.n(\lambda x.(\begin{array}{|l|}\hline \mathrm{e} \\ \hline \mathrm{smoke(e)} \\ \mathrm{agent(e,x)} \\ \hline\end{array}; p(e)))$$

red squirrel (>):

$$\mathrm{N} : \lambda x.\begin{array}{|l|}\hline \\ \hline \mathrm{red(x)} \\ \mathrm{squirrel(x)} \\ \hline\end{array}$$

A red squirrel (>):

$$\mathrm{NP} : \lambda q.(\begin{array}{|l|}\hline \mathrm{x} \\ \hline \mathrm{red(x)} \\ \mathrm{squirrel(x)} \\ \hline\end{array}; q(x))$$

A red squirrel smoked (<):

$$\mathrm{S[dcl]} : \lambda p.(\begin{array}{|l|}\hline \mathrm{x\ e} \\ \hline \mathrm{red(x)} \\ \mathrm{squirrel(x)} \\ \mathrm{smoke(e)} \\ \mathrm{agent(e,\ x)} \\ \hline\end{array}; p(e))$$

Zusammenfassung

Kategorialgrammatiken sind superspannend!

Literatur I

Abzianidze, L., Bjerva, J., Evang, K., Haagsma, H., van Noord, R., Ludmann, P., Nguyen, D.-D., and Bos, J. (2017). The Parallel Meaning Bank: Towards a multilingual corpus of translations annotated with compositional meaning representations. In *Proceedings of the 15th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics: Volume 2, Short Papers*, pages 242–247, Valencia, Spain. Association for Computational Linguistics.

Literatur II

Basile, V., Bos, J., Evang, K., and Venhuizen, N. (2012). Developing a large semantically annotated corpus. In *Proceedings of the Eighth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'12)*, pages 3196–3200, Istanbul, Turkey. European Language Resources Association (ELRA).

Bos, J. (2009). Towards a large-scale formal semantic lexicon for text processing. In *Proceedings of GSCL 2009*.

Bos, J., Basile, V., Evang, K., Venhuizen, N., and Bjerva, J. (2017). The Groningen Meaning Bank. In *The Handbook of Linguistic Annotation*. Springer, Berlin.

Literatur III

Kamp, H. (1981). A theory of truth and semantic representation. In Groenendijk, J. A., Jansen, T. M., and Stokhof, M. J., editors, *Formal Methods in the Study of Language*, pages 277–322. Mathematical Centre Amsterdam, Amsterdam.

Kamp, H. and Reyle, U. (1993). *From Discourse to Logic: An Introduction to Modeltheoretic Semantics of Natural Language, Formal Logic and DRT*. Kluwer, Dordrecht.

Steedman, M. (2000). *The Syntactic Process*. The MIT Press.