

# Recursive syntactic pattern learning by songbirds

Gentner, Fenn, Margoliash, Nusbaum (2006)

Eva Zimmermann

Rekursion, (Fabian Heck) SS06

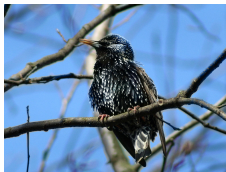
17.Juli 2008

Es wird gezeigt...

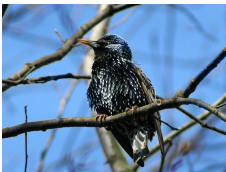
... dass europäische Stare in der Lage sind, eine rekursive, selbsteinbettende kontextfreie Grammatik zu lernen.



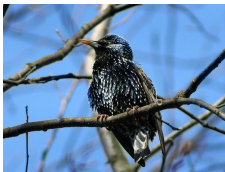
- der Gesang von Staren ist komponiert aus verschiedenen Motiven, die hier das Vokabular der zu lernenden „Grammatiken“ bildeten
- aus der Aufzeichnung des Gesangs eines Stares werden 8 „Knatter“- (A) und 8 „Träller“-Motive (B) isoliert, aus denen die Stimuli zusammengesetzt werden
- die Stare sollen zwei Grammatiken lernen: eine reguläre Grammatik (FSG) und eine kontextfreie Grammatik (CFG)



- der Gesang von Staren ist komponiert aus verschiedenen Motiven, die hier das Vokabular der zu lernenden „Grammatiken“ bildeten
- aus der Aufzeichnung des Gesangs eines Stares werden 8 „Knatter-“ (A) und 8 „Träller“-Motive (B) isoliert, aus denen die Stimuli zusammengesetzt werden
- die Stare sollen zwei Grammatiken lernen: eine reguläre Grammatik (FSG) und eine kontextfreie Grammatik (CFG)



- der Gesang von Staren ist komponiert aus verschiedenen Motiven, die hier das Vokabular der zu lernenden „Grammatiken“ bildeten
- aus der Aufzeichnung des Gesangs eines Stares werden 8 „Knatter-“ (A) und 8 „Träller“-Motive (B) isoliert, aus denen die Stimuli zusammengesetzt werden
- die Stare sollen zwei Grammatiken lernen: eine reguläre Grammatik (FSG) und eine kontextfreie Grammatik (CFG)



- der Gesang von Staren ist komponiert aus verschiedenen Motiven, die hier das Vokabular der zu lernenden „Grammatiken“ bildeten
- aus der Aufzeichnung des Gesangs eines Stares werden 8 „Knatter-“ (A) und 8 „Träller“-Motive (B) isoliert, aus denen die Stimuli zusammengesetzt werden
- die Stare sollen zwei Grammatiken lernen: eine reguläre Grammatik (FSG) und eine kontextfreie Grammatik (CFG)

## reguläre Grammatik: $(AB)^n$

- 1 ab
- 2 abab
- 3 ababab

- Endrekursion
- Typ-3 – Grammatik

- (1)  $S \Rightarrow aB$   
 $B \Rightarrow bA$   
 $A \Rightarrow aB$   
 $A \Rightarrow a$   
 $B \Rightarrow b$

## reguläre Grammatik: $(AB)^n$

- 1 ab
- 2 abab
- 3 ababab

- Endrekursion
- Typ-3 – Grammatik

- (1)  $S \Rightarrow aB$   
 $B \Rightarrow bA$   
 $A \Rightarrow aB$   
 $A \Rightarrow a$   
 $B \Rightarrow b$

reguläre Grammatik:  $(AB)^n$ 

- 1 ab
- 2 abab
- 3 ababab

- Endrekursion
- Typ-3 – Grammatik

- (1)  $S \Rightarrow aB$   
 $B \Rightarrow bA$   
 $A \Rightarrow aB$   
 $A \Rightarrow a$   
 $B \Rightarrow b$

reguläre Grammatik:  $(AB)^n$ 

- 1 ab
- 2 abab
- 3 ababab

- Endrekursion
- Typ-3 – Grammatik

- (1)  $S \Rightarrow aB$   
 $B \Rightarrow bA$   
 $A \Rightarrow aB$   
 $A \Rightarrow a$   
 $B \Rightarrow b$

reguläre Grammatik:  $(AB)^n$ 

- 1 ab
- 2 abab
- 3 ababab

- Endrekursion
- Typ-3 – Grammatik

- (1)  $S \Rightarrow aB$   
 $B \Rightarrow bA$   
 $A \Rightarrow aB$   
 $A \Rightarrow a$   
 $B \Rightarrow b$

## kontextfreie Grammatik: $A^n B^n$

- 1 ab
- 2 aabb
- 3 aaabbb

- Mittenrekursion
- Typ-2 – Grammatik

$$(2) \quad S \Rightarrow aSb$$
$$S \Rightarrow \varepsilon$$

## kontextfreie Grammatik: $A^n B^n$

- 1 ab
- 2 aabb
- 3 aaabbb

- Mittenrekursion
- Typ-2 – Grammatik

$$(2) \quad S \Rightarrow aSb$$
$$S \Rightarrow \varepsilon$$

## kontextfreie Grammatik: $A^n B^n$

- 1 ab
- 2 aabb
- 3 aaabbb

- Mittenrekursion
- Typ-2 – Grammatik

$$(2) \quad S \Rightarrow aSb$$
$$S \Rightarrow \varepsilon$$

## kontextfreie Grammatik: $A^n B^n$

- 1 ab
- 2 aabb
- 3 aaabbb

- Mittenrekursion
- Typ-2 – Grammatik

$$(2) \quad S \Rightarrow aSb$$
$$S \Rightarrow \varepsilon$$

## kontextfreie Grammatik: $A^n B^n$

1	ab
2	aabb
3	aaabbb

- Mittenrekursion
- Typ-2 – Grammatik

(2)  $S \Rightarrow aSb$   
 $S \Rightarrow \varepsilon$

### *Hypothese:*

Während FSG vollkommen ausreichen, alle nicht-menschlichen Kommunikationssysteme abzuleiten, hat einzig die menschliche Sprache die Fähigkeit zu (zentral-)rekursiver hierarchischer Einbettung, die nur von einer kontextfreien Grammatik beschrieben werden kann.

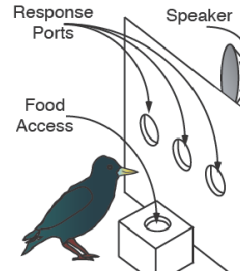
- es wurde den Vögeln beigebracht, dass die Sätze beider Grammatiken jeweils unterschiedliche Reaktionen hervorrufen sollten
- auf eine der beiden Grammatiken (S+) sollte eine Reaktion erfolgen, auf die jeweils andere keine (S-)
- für die eine Hälfte der Stare war  $CFS=S+$  und  $FSG=S-$ , für die anderen Stare waren die Verhältnisse dementsprechend umgekehrt

- es wurde den Vögeln beigebracht, dass die Sätze beider Grammatiken jeweils unterschiedliche Reaktionen hervorrufen sollten
- auf eine der beiden Grammatiken (S+) sollte eine Reaktion erfolgen, auf die jeweils andere keine (S-)
- für die eine Hälfte der Stare war  $CFS=S+$  und  $FSG=S-$ , für die anderen Stare waren die Verhältnisse dementsprechend umgekehrt

- es wurde den Vögeln beigebracht, dass die Sätze beider Grammatiken jeweils unterschiedliche Reaktionen hervorrufen sollten
- auf eine der beiden Grammatiken (S+) sollte eine Reaktion erfolgen, auf die jeweils andere keine (S-)
- für die eine Hälfte der Stare war  $CFS=S+$  und  $FSG=S-$ , für die anderen Stare waren die Verhältnisse dementsprechend umgekehrt

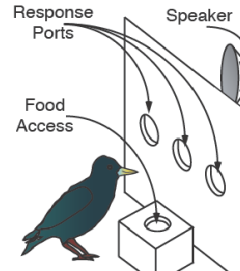
## Stare lernen mittels operantem Konditionieren:

- 11 erwachsene Stare, die schon 3 Jahre in Gefangenschaft in Gemeinschaft mit Kollegen beiderlei Geschlechts leben, werden getestet
- sie sitzen in „Behavioral apparatus“, haben in ihrem Käfig Zugang zu 3 verschiedenen „Knöpfen“ und einem potentiell futterlieferndem Fressnapf
- hören über Lautsprecher die Stimuli
- richtiges Verhalten (i.e. Reaktion auf S+ Stimuli, keine Reaktion auf S-) wurden mit Futter belohnt, inkorrekte Reaktionen mit gedämpftem Licht bestraft



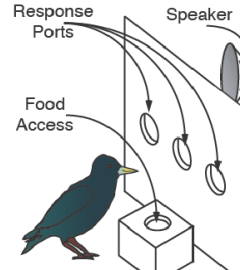
## Stare lernen mittels operantem Konditionieren:

- 11 erwachsene Stare, die schon 3 Jahre in Gefangenschaft in Gemeinschaft mit Kollegen beiderlei Geschlechts leben, werden getestet
- sie sitzen in „Behavioral apparatus“, haben in ihrem Käfig Zugang zu 3 verschiedenen „Knöpfen“ und einem potentiell futterlieferndem Fressnapf
- hören über Lautsprecher die Stimuli
- richtiges Verhalten (i.e. Reaktion auf S+ Stimuli, keine Reaktion auf S-) wurden mit Futter belohnt, inkorrekte Reaktionen mit gedämpftem Licht bestraft



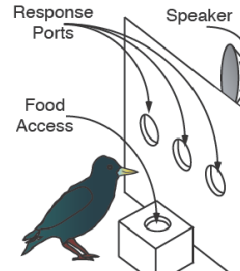
### *Stare lernen mittels operantem Konditionieren:*

- 11 erwachsene Stare, die schon 3 Jahre in Gefangenschaft in Gemeinschaft mit Kollegen beiderlei Geschlechts leben, werden getestet
- sie sitzen in „Behavioral apparatus“, haben in ihrem Käfig Zugang zu 3 verschiedenen „Knöpfen“ und einem potentiell futterlieferndem Fressnapf
- hören über Lautsprecher die Stimuli
- richtiges Verhalten (i.e. Reaktion auf S+ Stimuli, keine Reaktion auf S-) wurden mit Futter belohnt, inkorrekte Reaktionen mit gedämpftem Licht bestraft



### *Stare lernen mittels operantem Konditionieren:*

- 11 erwachsene Stare, die schon 3 Jahre in Gefangenschaft in Gemeinschaft mit Kollegen beiderlei Geschlechts leben, werden getestet
- sie sitzen in „Behavioral apparatus“, haben in ihrem Käfig Zugang zu 3 verschiedenen „Knöpfen“ und einem potentiell futterlieferndem Fressnapf
- hören über Lautsprecher die Stimuli
- richtiges Verhalten (i.e. Reaktion auf S+ Stimuli, keine Reaktion auf S-) wurden mit Futter belohnt, inkorrekte Reaktionen mit gedämpftem Licht bestraft



## Ablauf

Bedingung	Stimuli	Items
Basistraining	$A^n B^n$ und $(AB)^n$ , ( $n=2$ )	
Transfer 1	neue $A^n B^n$ und $(AB)^n$ , ( $n=2$ )	10%
Probe Test 1	bekannte $A^n B^n$ und $(AB)^n$ , ( $n=2$ )	80%
	neue $A^n B^n$ und $(AB)^n$ , ( $n=2$ )	10%
	ungrammatische Sequenzen: AAAA, BBBB, ABBA, BAAB	10%
Probe Test 2	bekannte $A^n B^n$ und $(AB)^n$ , ( $n=2$ )	80%
	neue $A^n B^n$ und $(AB)^n$ , ( $n=3, 4$ )	20%
Probe Test 3	bekannte $A^n B^n$ und $(AB)^n$ , ( $n=2$ )	80%
	$A^* B^*$	10%
	neue $A^n B^n$ und $(AB)^n$ , ( $n=2, 3, 4$ )	10%

## Die Stare lernten nicht einfach nur „Sätze“ auswendig:

- 1 Sie konnten im Transfer 1 **neue Sätze** den beiden Grammatiken zuordnen und waren signifikant besser als hätten sie zufällig geraten.
- 2 Die Reaktionen auf die **ungrammatischen Stimuli** in den Probe Tests war signifikant unterschieden von denen auf die neu gebildeten Melodien der beiden Grammatiken.
- 3 Sie konnten auch von den einfachen  $n=2$  – Ketten, mit denen ihr Training stattfand, auf **Ketten höherer Ordnung** generalisieren, i.e. die  $n=3$  –,  $n=4$  – Stimuli lieferten das identische Ergebnis einer korrekten Klassifikation in die beiden Grammatiken

## Die Stare lernten nicht einfach nur „Sätze“ auswendig:

- 1 Sie konnten im Transfer 1 **neue Sätze** den beiden Grammatiken zuordnen und waren signifikant besser als hätten sie zufällig geraten.
- 2 Die Reaktionen auf die **ungrammatischen Stimuli** in den Probe Tests war signifikant unterschieden von denen auf die neu gebildeten Melodien der beiden Grammatiken.
- 3 Sie konnten auch von den einfachen  $n=2$  – Ketten, mit denen ihr Training stattfand, auf **Ketten höherer Ordnung** generalisieren, i.e. die  $n=3$  –,  $n=4$  – Stimuli lieferten das identische Ergebnis einer korrekten Klassifikation in die beiden Grammatiken

## Die Stare lernten nicht einfach nur „Sätze“ auswendig:

- 1 Sie konnten im Transfer 1 **neue Sätze** den beiden Grammatiken zuordnen und waren signifikant besser als hätten sie zufällig geraten.
- 2 Die Reaktionen auf die **ungrammatischen Stimuli** in den Probe Tests war signifikant unterschieden von denen auf die neu gebildeten Melodien der beiden Grammatiken.
- 3 Sie konnten auch von den einfachen  $n=2$  – Ketten, mit denen ihr Training stattfand, auf **Ketten höherer Ordnung** generalisieren, i.e. die  $n=3$  –,  $n=4$  – Stimuli lieferten das identische Ergebnis einer korrekten Klassifikation in die beiden Grammatiken

Gentner et al. diskutieren eine Reihe von alternativen Lösungsansätzen, die noch einmal belegen sollen, dass es keine Lösung im Rahmen einer regulären FSG gibt, die das Verhalten der Vögel erklären kann.

## Alternative Lösungsstrategie 1: $A^* B^*$ gelernt

Die Vögel haben „einfachere Grammatik“ gelernt, i.e. die Obermengengrammatik  $A^* B^*$ , die von einer FSG abgeleitet werden kann.

Vorhersage wäre, dass die Stimuli, die von einer solchen Grammatik generiert werden, gleich behandelt werden wie jene von  $A^n B^n$  generierte.

- ▶ die Reaktionen auf die  $A^* B^*$ -Stimuli ( $A^1 B^3$ ,  $A^3 B^1$ ,  $A^2 B^3$ ,  $A^3 B^2$ ) waren aber sehr anders als solche auf  $A^2 B^2$  oder  $A^4 B^4$ .
- ▶ Zudem waren ihre Reaktionen auf die von  $A^* B^*$  generierten Stimuli keineswegs konsistent: sie schienen sie nicht als eine Klasse aufzufassen.

## Alternative Lösungsstrategie 1: $A^* B^*$ gelernt

Die Vögel haben „einfachere Grammatik“ gelernt, i.e. die Obermengengrammatik  $A^* B^*$ , die von einer FSG abgeleitet werden kann.

Vorhersage wäre, dass die Stimuli, die von einer solchen Grammatik generiert werden, gleich behandelt werden wie jene von  $A^n B^n$  generierte.

- ▶ die Reaktionen auf die  $A^* B^*$ -Stimuli ( $A^1 B^3$ ,  $A^3 B^1$ ,  $A^2 B^3$ ,  $A^3 B^2$ ) waren aber sehr anders als solche auf  $A^2 B^2$  oder  $A^4 B^4$ .
- ▶ Zudem waren ihre Reaktionen auf die von  $A^* B^*$  generierten Stimuli keineswegs konsistent: sie schienen sie nicht als eine Klasse aufzufassen.

## Alternative Lösungsstrategie 1: $A^* B^*$ gelernt

Die Vögel haben „einfachere Grammatik“ gelernt, i.e. die Obermengengrammatik  $A^* B^*$ , die von einer FSG abgeleitet werden kann.

Vorhersage wäre, dass die Stimuli, die von einer solchen Grammatik generiert werden, gleich behandelt werden wie jene von  $A^n B^n$  generierte.

► die Reaktionen auf die  $A^* B^*$ -Stimuli ( $A^1 B^3$ ,  $A^3 B^1$ ,  $A^2 B^3$ ,  $A^3 B^2$ ) waren aber sehr anders als solche auf  $A^2 B^2$  oder  $A^4 B^4$ .

► Zudem waren ihre Reaktionen auf die von  $A^* B^*$  generierten Stimuli keineswegs konsistent: sie schienen sie nicht als eine Klasse aufzufassen.

## Alternative Lösungsstrategie 1: $A^* B^*$ gelernt

Die Vögel haben „einfachere Grammatik“ gelernt, i.e. die Obermengengrammatik  $A^* B^*$ , die von einer FSG abgeleitet werden kann.

Vorhersage wäre, dass die Stimuli, die von einer solchen Grammatik generiert werden, gleich behandelt werden wie jene von  $A^n B^n$  generierte.

- ▶ die Reaktionen auf die  $A^* B^*$ -Stimuli ( $A^1 B^3$ ,  $A^3 B^1$ ,  $A^2 B^3$ ,  $A^3 B^2$ ) waren aber sehr anders als solche auf  $A^2 B^2$  oder  $A^4 B^4$ .
- ▶ Zudem waren ihre Reaktionen auf die von  $A^* B^*$  generierten Stimuli keineswegs konsistent: sie schienen sie nicht als eine Klasse aufzufassen.

## Lösungsstrategie 2: „Achte nur auf die ersten beiden Motive!“

Annahme des klugen Stars:

$AA_{xx} \rightarrow \text{CFG}$

$AB_{xx} \rightarrow \text{FSG}$

Vorhersage dieser Strategie wäre, dass die (ungrammatischen) Stimuli AAAA und ABBA genauso behandelt würden wie die neuen Stimuli, die  $A^n B^n$  und  $(AB)^n$  generierten.

## Lösungsstrategie 2: „Achte nur auf die ersten beiden Motive!“

Annahme des klugen Stars:

$AA_{xx} \rightarrow \text{CFG}$

$AB_{xx} \rightarrow \text{FSG}$

Vorhersage dieser Strategie wäre, dass die (ungrammatischen) Stimuli AAAA und ABBA genauso behandelt würden wie die neuen Stimuli, die  $A^n B^n$  und  $(AB)^n$  generierten.

### Lösungsstrategie 3: „Achte nur auf die letzten beiden Motive!“

Annahme des klugen Stars:

xxBB → CFG

xxAB → FSG

Vorhersage dieser Strategie wäre, dass die (ungrammatischen) Stimuli BBBB und ABBA genauso behandelt würden wie die neuen Stimuli, die  $A^n B^n$  und  $(AB)^n$  generierten.

► dem ist nicht so! AAAA, BBBB, ABBA, BAAB riefen signifikant anderes Verhalten als die unbekanntenen von  $A^n B^n$  und  $(AB)^n$  generierten Stimuli hervor.

### Lösungsstrategie 3: „Achte nur auf die letzten beiden Motive!“

Annahme des klugen Stars:

xxBB → CFG

xxAB → FSG

Vorhersage dieser Strategie wäre, dass die (ungrammatischen) Stimuli BBBB und ABBA genauso behandelt würden wie die neuen Stimuli, die  $A^n B^n$  und  $(AB)^n$  generierten.

► dem ist nicht so! AAAA, BBBB, ABBA, BAAB riefen signifikant anderes Verhalten als die unbekanntenen von  $A^n B^n$  und  $(AB)^n$  generierten Stimuli hervor.

### Lösungsstrategie 3: „Achte nur auf die letzten beiden Motive!“

Annahme des klugen Stars:

$xxBB \rightarrow \text{CFG}$

$xxAB \rightarrow \text{FSG}$

Vorhersage dieser Strategie wäre, dass die (ungrammatischen) Stimuli BBBB und ABBA genauso behandelt würden wie die neuen Stimuli, die  $A^n B^n$  und  $(AB)^n$  generierten.

► dem ist nicht so! AAAA, BBBB, ABBA, BAAB riefen signifikant anderes Verhalten als die unbekanntenen von  $A^n B^n$  und  $(AB)^n$  generierten Stimuli hervor.

## Lösungstrategie 4?: FSG

Da die getesteten Stimuli (notwendig) eine endliche Menge darstellen, ist eine (sehr komplexe) FSG möglich, die diese finite Menge ableitet.

Eine Sprache, die einzig aus den (einzig getesteten) Ketten aabb, aaabbb, aaaabbbb besteht, von einer FSG mit 13 Regeln abgeleitet werden.

$$(3) \quad \begin{array}{ll} S \Rightarrow aC & H \Rightarrow b \\ C \Rightarrow aD & F \Rightarrow aJ \\ D \Rightarrow bE & J \Rightarrow bK \\ E \Rightarrow b & K \Rightarrow bL \\ D \Rightarrow aF & L \Rightarrow bM \\ F \Rightarrow bG & M \Rightarrow b \\ G \Rightarrow bH & \end{array}$$

## Lösungsstrategie 4?: FSG

Da die getesteten Stimuli (notwendig) eine endliche Menge darstellen, ist eine (sehr komplexe) FSG möglich, die diese finite Menge ableitet.

Eine Sprache, die einzig aus den (einzig getesteten) Ketten  $aabb$ ,  $aaabbb$ ,  $aaaabbbb$  besteht, von einer FSG mit 13 Regeln abgeleitet werden.

$$\begin{array}{ll}
 (3) & S \Rightarrow aC \\
 & C \Rightarrow aD \\
 & D \Rightarrow bE \\
 & E \Rightarrow b \\
 & D \Rightarrow aF \\
 & F \Rightarrow bG \\
 & G \Rightarrow bH \\
 & H \Rightarrow b \\
 & F \Rightarrow aJ \\
 & J \Rightarrow bK \\
 & K \Rightarrow bL \\
 & L \Rightarrow bM \\
 & M \Rightarrow b
 \end{array}$$

## Lösungstrategie 4?: FSG

Da die getesteten Stimuli (notwendig) eine endliche Menge darstellen, ist eine (sehr komplexe) FSG möglich, die diese finite Menge ableitet.

Eine Sprache, die einzig aus den (einzig getesteten) Ketten  $aabb$ ,  $aaabbb$ ,  $aaaabbbb$  besteht, von einer FSG mit 13 Regeln abgeleitet werden.

$$\begin{array}{ll}
 (3) & S \Rightarrow aC \\
 & C \Rightarrow aD \\
 & D \Rightarrow bE \\
 & E \Rightarrow b \\
 & D \Rightarrow aF \\
 & F \Rightarrow bG \\
 & G \Rightarrow bH \\
 & H \Rightarrow b \\
 & F \Rightarrow aJ \\
 & J \Rightarrow bK \\
 & K \Rightarrow bL \\
 & L \Rightarrow bM \\
 & M \Rightarrow b
 \end{array}$$

- Gentner et al. argumentieren, dass von dieser so komplexen Grammatik einzig 4 Ersetzungsregeln aus dem initialen Input abzuleiten sind, ganz im Gegensatz zu der CFG, die nur ein einziges Nonterminal und eine Ersetzungsregel (+Endregel) benötigt.

## Zusammenfassung

Stare konnten die CFG und FSG unterscheiden, i.e. lernen. Sie waren in der Lage, wohlgeformte von nicht-wohlgeformten Ketten einer kontextfreien zentraleinbettenden Grammatik zu unterscheiden.

Die Annahme, dass Rekursion den Kern menschlicher Sprachfähigkeit (FLN) darstellt, ist damit infrage gestellt.

## Zusammenfassung

Stare konnten die CFG und FSG unterscheiden, i.e. lernen. Sie waren in der Lage, wohlgeformte von nicht-wohlgeformten Ketten einer kontextfreien zentraleinbettenden Grammatik zu unterscheiden. Die Annahme, dass Rekursion den Kern menschlicher Sprachfähigkeit (FLN) darstellt, ist damit infrage gestellt.

## Diskussion

- Go/No-Go – Experiment: was ist eine „andere Reaktion“ auf einen Stimulus?
- wie werden „ungrammatische„ Stimuli von den Vögeln gekennzeichnet? Alles, was sie tun können, ist ja eine Einordnung in eine der beiden Grammatiktypen...
- Produktion?

## Diskussion

- Go/No-Go – Experiment: was ist eine „andere Reaktion“ auf einen Stimulus?
- wie werden „ungrammatische„ Stimuli von den Vögeln gekennzeichnet? Alles, was sie tun können, ist ja eine Einordnung in eine der beiden Grammatiktypen...
- Produktion?

## Diskussion

- Go/No-Go – Experiment: was ist eine „andere Reaktion“ auf einen Stimulus?
- wie werden „ungrammatische„ Stimuli von den Vögeln gekennzeichnet? Alles, was sie tun können, ist ja eine Einordnung in eine der beiden Grammatiktypen...
- Produktion?

Genter, Fenn, Gargoliash und Nusbaum (2006): *Recursive syntactic pattern learning by songbirds*, In: Nature 440, 1204-1207.

+ *Supplementary information*:

<http://www.nature.com/nature/journal/v440/n7088/full/nature04675.html>