

# Vorlesung 10b

## Mehrstufige Zufallsexperimente

# 1. Mehrstufigkeit und Multiplikationsregel

(Buch S. 94)

bisher Zweistufigkeit nur von “heute” zu “morgen”

jetzt zusätzlich von “heute & morgen” zu “übermorgen”, etc.

Für jedes  $i = 1, \dots, n - 1$  hat man

*Übergangswahrscheinlichkeiten*

$$P(a_1 \dots a_i, a_{i+1}) = P_{a_1 \dots a_i}(X_{i+1} = a_{i+1}),$$

die angeben,

mit welcher Wahrscheinlichkeit in der  $(i + 1)$ -ten Stufe

das Ereignis  $\{X_{i+1} = a_{i+1}\}$  eintritt,

gegeben das Eintreten von  $\{X_1 = a_1, \dots, X_i = a_i\}$ .

Die gemeinsame Verteilung von  $X_1, \dots, X_n$   
ergibt sich rekursiv als

*Multiplikationsregel*

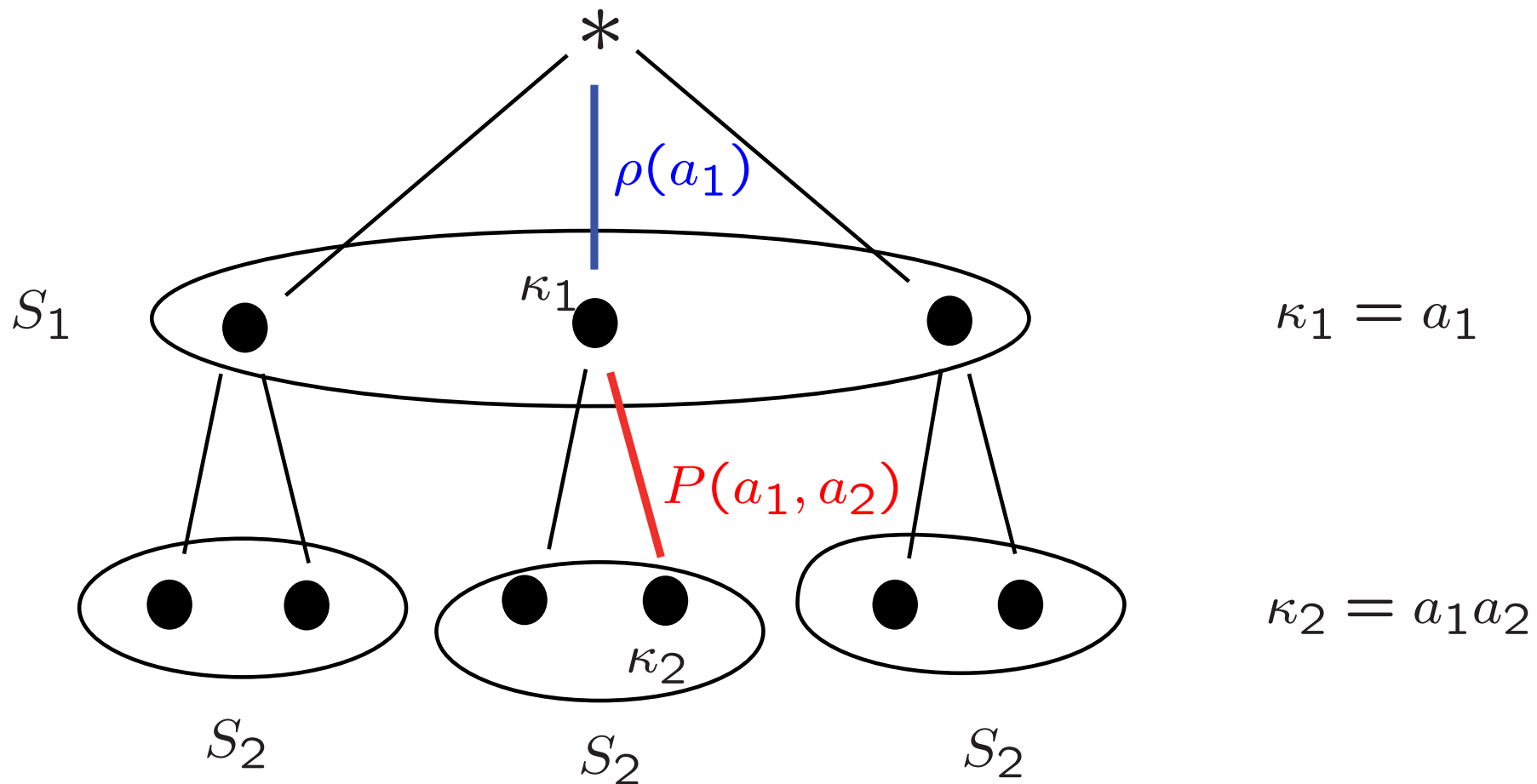
$$\begin{aligned} & \mathbf{P}(X_1 = a_1, \dots, X_n = a_n) \\ = & \mathbf{P}(X_1 = a_1, \dots, X_{n-1} = a_{n-1})P(a_1 \dots a_{n-1}, a_n) \\ & = \dots \\ = & \rho(a_1)P(a_1, a_2) \dots P(a_1 \dots a_{n-1}, a_n) . \end{aligned}$$

## 2. Veranschaulichung von mehrstufigen Zufallsexperimenten durch Bäume

(Buch S. 95)

Wir erinnern uns an die

**Veranschaulichung von zweistufigen Experimenten  
durch *Bäume*:**



$\mathbf{P}(X_1 = a_1, X_2 = a_2) = \rho(a_1)P(a_1, a_2).$   
 (Produkt der Kantengewichte von  $\ast$  zum Knoten  $\kappa_2$ )

**Was 2 recht ist, ist  $i + 1$  billig:**

$\kappa_i = a_1 \dots a_i$  ist ein *Knoten der Tiefe  $i$*

Die *Nachfolger* von  $\kappa_i$  sind von der Form  $\kappa_i a_{i+1}$

Die *Kanten* des Baums erhalten die Gewichte

$$g(*, \kappa_1) := \rho(a_1), \quad g(\kappa_i, \kappa_{i+1}) := P(a_1 \dots a_i, a_{i+1})$$

mit  $\kappa_1 = a_1$ ,  $\kappa_i = a_1 \dots a_i$ ,  $\kappa_{i+1} = a_1 \dots a_{i+1}$ .

Die *Wahrscheinlichkeit*, in einem bestimmten Blatt zu enden,

ergibt sich als *Produkt* der *Kantengewichte*

entlang des *Weges* von der *Wurzel* zum *Blatt*.



### 3. Die Pólya-Urne

Oder

Wo Tauben sind, fliegen Tauben zu ....

(Buch S. 94)

In einer Urne befinden sich anfangs  
eine rote und eine blaue Kugel.

In jedem Schritt wird eine Kugel rein zufällig gezogen und  
gemeinsam mit einer zusätzlichen Kugel derselben Farbe  
zurückgelegt.

Die Zufallsvariable  $Z_i$  mit Werten in  $\{0, 1\}$  bezeichne die  
im  $i$ -ten Zug vorgefundene Farbe (0 für blau, 1 für rot).

Wir nennen dann  $(Z_1, \dots, Z_n)$  auch  
eine (Standard-) *Pólya-Folge* der Länge  $n$ .

$$P(Z_1 = 0) = P(Z_1 = 1) = \frac{1}{2}$$

$$P_0(Z_2 = 0) = \frac{2}{3}$$

(das ist die **W**'keit, beim zweiten Zug blau zu ziehen,  
wenn beim ersten Zug blau gezogen wurde)

$$P_0(Z_2 = 1) = \frac{1}{3}$$

$$P_{00}(Z_3 = 0) = \frac{3}{4}$$

$$P_{01}(Z_3 = 0) = \frac{2}{4}$$

u. s. w.

Die Übergangswahrscheinlichkeiten sind

$$\mathbf{P}_{a_1 \dots a_i}(Z_{i+1} = a_{i+1}) = \frac{1 + \ell}{2 + i} \text{ mit } a_1, \dots, a_i, a_{i+1} = 0, 1,$$

$$\ell = \ell(a_1, \dots, a_{i+1}) := \#\{j : 1 \leq j \leq i, a_j = a_{i+1}\} ;$$

$1 + \ell$  ist also die Zahl der Kugeln in der Urne nach  $i$  Zügen, deren Farbe mit der Farbe der  $i + 1$ -ten gezogenen Kugel übereinstimmt.

Z. B. ist

$$\begin{aligned} \mathbf{P}((Z_1, \dots, Z_8) = (1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1)) &= \frac{1}{2} \frac{2}{3} \frac{1}{4} \frac{3}{5} \frac{2}{6} \frac{3}{7} \frac{4}{8} \frac{5}{9} \\ &= \frac{5! 3!}{9!}. \end{aligned}$$

Für  $0 \leq k \leq n$  hat jede 01-Zugfolge  $(a_1, \dots, a_n)$   
mit  $a_1 + \dots + a_n = k$  dieselbe Wahrscheinlichkeit, nämlich

$$(*) \quad \mathbf{P}((Z_1, \dots, Z_n) = (a_1, \dots, a_n)) = \frac{k!(n-k)!}{(n+1)!} = \frac{1}{n+1} \binom{n}{k}^{-1}$$

Für  $0 \leq k \leq n$  hat jede 01-Zugfolge  $(a_1, \dots, a_n)$  mit  $a_1 + \dots + a_n = k$  dieselbe Wahrscheinlichkeit, nämlich

$$\mathbf{P}((Z_1, \dots, Z_n) = (a_1, \dots, a_n)) = \frac{1}{n+1} \binom{n}{k}^{-1}.$$

Es gibt  $\binom{n}{k}$  derartige Zugfolgen. Also ist

$$\mathbf{P}(Z_1 + \dots + Z_n = k) = \frac{1}{n+1}, \quad k = 0, \dots, n.$$

**Fazit: Die Anzahl der nach  $n$  Zügen hinzugekommenen roten Kugeln ist uniform verteilt in  $\{0, 1, \dots, n\}$ .**

## 4. Pólya-Urne mit $g$ Farben

(Buch S. 95)

## Pólya-Urne mit $g$ Farben:

Wieder wird in jedem Zug die gezogene Kugel zusammen mit einer gleichfarbigen Kugel zurückgelegt.

Die Anfangsbesetzung sei  $(1, \dots, 1)$ ,  
also je eine Kugel von jeder Farbe.

$X_{jn} := \#$  Zugänge der Farbe  $j$  nach  $n$  Schritten.



Sei  $(k_1, \dots, k_g) \in S_{n,r}$ ,  
d.h.  $k_j \in \mathbb{N}_0$  mit  $k_1 + \dots + k_g = n$ .

Man sieht wie im Fall  $g = 2$ :

Alle möglichen Zugfolgen  
von  $(1, \dots, 1)$  nach  $(1 + k_1, \dots, 1 + k_g)$   
haben dieselbe Wahrscheinlichkeit, nämlich

$$\frac{k_1! \cdots k_g!}{g \cdot (g+1) \cdots (n+g-1)} = \frac{k_1! \cdots k_g!}{(n+g-1)!} (g-1)! .$$

Alle möglichen Zugfolgen  
 von  $(1, \dots, 1)$  nach  $(1 + k_1, \dots, 1 + k_g)$   
 haben dieselbe Wahrscheinlichkeit, nämlich

$$k_1! \cdots k_g! \frac{(g-1)!}{(n+g-1)!}.$$

Es gibt  $\binom{n}{k_1, \dots, k_g} = \frac{n!}{k_1! \cdots k_g!}$  solche Zugfolgen. Also ist

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(X_{1n} = k_1, \dots, X_{gn} = k_g) &= n! \frac{(g-1)!}{(n+g-1)!} \\ &= \frac{1}{\binom{n+g-1}{n}} \end{aligned}$$

$$\mathbf{P}(X_{1n} = k_1, \dots, X_{gn} = k_g) = \frac{1}{\binom{n+g-1}{n}},$$

d.h.  $(X_{1n}, \dots, X_{gn})$  ist uniform verteilt auf  $S_{n,g}$ .

Fazit:

Die Pólya-Urne mit Anfangsbesetzung  $(1, \dots, 1)$

liefert

uniform verteilte Besetzungen!