Notationen im Spezialfall $n = 2$

- Im Folgenden wird (auch für weitere Anwendungen) regelmäßig der Spezialfall $n = 2$ betrachtet.
- Zur Vereinfachung der Darstellung (insbesondere zur Vermeidung doppelter Indizes) sei der betrachtete Zufallsvektor $\mathbf{X}$ dann mit $\mathbf{X} = (X, Y)'$ oder $\mathbf{X} = (X, Y)$ statt $\mathbf{X} = (X_1, X_2)'$ bezeichnet.
- Stetige 2-dimensionale Zufallsvektoren $\mathbf{X} = (X, Y)$ werden in der Regel durch die Angabe einer gemeinsamen Dichtefunktion

$$f_{X,Y} : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}; \; (x, y) \mapsto f_{X,Y}(x, y)$$

  spezifizert.
- Ist $\mathbf{X} = (X, Y)$ ein zweidimensionaler diskreter Zufallsvektor mit „wenigen“ Trägerpunkten, stellt man die gemeinsame Verteilung — analog zu den Kontingenztabellen der deskriptiven Statistik — gerne in Tabellenform dar.

Beispiel: (Gemeinsame) Wahrscheinlichkeitsfunktion

bei zweidimensionaler diskreter Zufallsvariable

- Ist $\mathbf{X} = (X, Y)$ zweidimensionale diskrete Zufallsvariable mit endlichem Träger, $A := T(X) = \{x_1, \ldots, x_k\}$ der Träger von X und $B := T(Y) = \{y_1, \ldots, y_l\}$ der Träger von Y, so werden die Werte der Wahrscheinlichkeitsfunktion $p_{\mathbf{X}}$ auch mit

$$p_{ij} := p_{(X,Y)}(x_i, y_j) \qquad \text{für } i \in \{1, \ldots, k\} \text{ und } j \in \{1, \ldots, l\}$$

  bezeichnet und wie folgt tabellarisch dargestellt:

$X \setminus Y$	y_1	y_2	$\cdots$	y_l
x_1	p_{11}	p_{12}	$\cdots$	p_{1l}
x_2	p_{21}	p_{22}	$\cdots$	p_{2l}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
x_k	p_{k1}	p_{k2}	$\cdots$	p_{kl}

Randverteilungen I

- Wie in der deskriptiven Statistik lassen sich die Verteilungen der einzelnen Zufallsvariablen eines n-dimensionalen Zufallsvektors auch aus der gemeinsamen Verteilung gewinnen.
- Analog zu den „Randhäufigkeiten“ erhält man so die **Randverteilungen** der einzelnen Komponenten des Zufallsvektors.
- Ist $\mathbf{X}$ diskreter n-dimensionaler Zufallsvektor mit Wahrscheinlichkeitsfunktion $p_{\mathbf{X}}$, so erhält man für $j \in \{1, \ldots, n\}$ die Wahrscheinlichkeitsfunktion p_{X_j} zur j-ten Komponente X_j durch:

$$p_{X_j}(x) = \sum_{\substack{\mathbf{x}_i = (x_{i,1}, \ldots, x_{i,n}) \\ x_{i,j} = x}} p_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}_i)$$

Randverteilungen II

- Ist $\mathbf{X}$ stetiger n-dimensionaler Zufallsvektor mit gemeinsamer Dichtefunktion $f_{\mathbf{X}}$, so erhält man für $j \in \{1, \ldots, n\}$ eine Dichtefunktion $f_{X_j} : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ zur j-ten Komponente X_j durch:

$$f_{X_j}(x) = \underbrace{\int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty}}_{(n-1)\text{-mal}} f_{\mathbf{X}}(x_1, \ldots, x_{j-1}, x, x_{j+1}, \ldots, x_n) dx_n \cdots dx_{j+1} dx_{j-1} \cdots dx_1$$

- Für $\mathbf{X} = (X, Y)$ erhält man also eine Randdichtefunktion f_X zu X durch

$$f_X(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{X,Y}(x, y) dy$$

  sowie eine Randdichtefunktion f_Y zu Y durch

$$f_Y(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{X,Y}(x, y) dx \; .$$

Fortsetzung Beispiel (zweidimensional, diskret)

Ergänzung der gemeinsamen Wahrscheinlichkeitstabelle um Randverteilungen

- Ist $A = T(X) = \{x_1, \dots, x_k\}$ der Träger von X und $B = T(Y) = \{y_1, \dots, y_l\}$ der Träger von Y, so erhält man für $i \in \{1, \dots, k\}$ als Zeilensummen

$$p_{i\cdot} := p_X(x_i) = \sum_{j=1}^{l} p_{(X,Y)}(x_i, y_j) = \sum_{j=1}^{l} p_{ij}$$

sowie für $j \in \{1, \dots, l\}$ als Spaltensummen

$$p_{\cdot j} := p_Y(y_j) = \sum_{i=1}^{k} p_{(X,Y)}(x_i, y_j) = \sum_{i=1}^{k} p_{ij}$$

und damit insgesamt die folgende ergänzte Tabelle:

$X \setminus Y$	y_1	y_2	$\cdots$	y_l	$p_{i\cdot}$
x_1	p_{11}	p_{12}	$\cdots$	p_{1l}	$p_{1\cdot}$
x_2	p_{21}	p_{22}	$\cdots$	p_{2l}	$p_{2\cdot}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\vdots$
x_k	p_{k1}	p_{k2}	$\cdots$	p_{kl}	$p_{k\cdot}$
$p_{\cdot j}$	$p_{\cdot 1}$	$p_{\cdot 2}$	$\cdots$	$p_{\cdot l}$	1

(Stochastische) Unabhängigkeit von Zufallsvariablen I

- Die Komponenten $X_1, \dots, X_n$ eines n-dimensionalen Zufallsvektors werden genau dann **stochastisch unabhängig** genannt, wenn alle Ereignisse der Form
$$\{X_1 \in B_1\}, \dots, \{X_n \in B_n\} \qquad \text{für } B_1, \dots, B_n \in \mathcal{B}$$
stochastisch unabhängig sind:

Definition 10.4

Seien $n \in \mathbb{N}$ und $X_1, \dots, X_n$ Zufallsvariablen über demselben Wahrscheinlichkeitsraum $(\Omega, \mathcal{F}, P)$. Dann heißen die Zufallsvariablen $X_1, \dots, X_n$ **(stochastisch) unabhängig**, wenn für alle $B_1, \dots, B_n \in \mathcal{B}$ gilt:

$$P\{X_1 \in B_1, \dots, X_n \in B_n\} = \prod_{i=1}^{n} P\{X_i \in B_i\} = P\{X_1 \in B_1\} \cdot \ldots \cdot P\{X_n \in B_n\}$$

(Stochastische) Unabhängigkeit von Zufallsvariablen II

- Man kann weiter zeigen, dass n diskrete Zufallsvariablen $X_1, \dots, X_n$ über einem gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsraum $(\Omega, \mathcal{F}, P)$ genau dann stochastisch unabhängig sind, wenn für den (in diesem Fall ebenfalls diskreten) Zufallsvektor $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_n)'$ bzw. die zugehörigen Wahrscheinlichkeitsfunktionen für alle $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ gilt:

$$p_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^{n} p_{X_i}(x_i) = p_{X_1}(x_1) \cdot \ldots \cdot p_{X_n}(x_n)$$

- Insbesondere sind X und Y im Fall $n = 2$ mit $\mathbf{X} = (X, Y)$ bei endlichen Trägern $A = T(X) = \{x_1, \dots, x_k\}$ von X und $B = T(Y) = \{y_1, \dots, y_l\}$ von Y unabhängig, falls $p_{ij} = p_{i\cdot} \cdot p_{\cdot j}$ gilt für alle $i \in \{1, \dots, k\}$ und $j \in \{1, \dots, l\}$.

(Stochastische) Unabhängigkeit von Zufallsvariablen III

- Weiterhin sind n stetige Zufallsvariablen $X_1, \dots, X_n$ über einem gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsraum $(\Omega, \mathcal{F}, P)$ stochastisch unabhängig, wenn der Zufallsvektor $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_n)'$ stetig ist und eine gemeinsame Dichte $f_{\mathbf{X}}$ bzw. Randdichten $f_{X_1}, \dots, f_{X_n}$ existieren, so dass für alle $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ gilt:

$$f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^{n} f_{X_i}(x_i) = f_{X_1}(x_1) \cdot \ldots \cdot f_{X_n}(x_n)$$

- Insbesondere sind stetige Zufallsvariablen X und Y im Fall $n = 2$ mit $\mathbf{X} = (X, Y)$ genau dann unabhängig, wenn es Dichtefunktionen f_X von X, f_Y von Y sowie $f_{X,Y}$ von (X, Y) gibt mit

$$f_{X,Y}(x, y) = f_X(x) \cdot f_Y(y) \qquad \text{für alle } x, y \in \mathbb{R}\ .$$

Bedingte Verteilungen 2-dim. Zufallsvektoren I

Definition 10.5 (Bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung (diskret))

Seien $\mathbf{X} = (X, Y)$ ein diskreter zweidimensionaler Zufallsvektor mit Wahrscheinlichkeitsfunktion $p_{(X,Y)}$, p_Y die Wahrscheinlichkeitsfunktion zur Randverteilung von Y, $y \in T(Y)$. Dann heißt die durch die Wahrscheinlichkeitsfunktion

$$p_{X|Y=y} : \mathbb{R} \to [0,1]; p_{X|Y=y}(x) = \frac{p_{(X,Y)}(x,y)}{p_Y(y)}$$

definierte diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung **bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung von** X **unter der Bedingung** $Y = y$.
Analog nennt man für $x \in T(X)$ die durch die Wahrscheinlichkeitsfunktion

$$p_{Y|X=x} : \mathbb{R} \to [0,1]; p_{Y|X=x}(y) = \frac{p_{(X,Y)}(x,y)}{p_X(x)}$$

definierte diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung **bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung von** Y **unter der Bedingung** $X = x$.

Bedingte Verteilungen 2-dim. Zufallsvektoren II

Definition 10.6 (Bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung (stetig))

Seien $\mathbf{X} = (X, Y)$ ein stetiger zweidimensionaler Zufallsvektor, $f_{(X,Y)}$ eine gemeinsame Dichtefunktion von (X, Y), f_Y eine Dichtefunktion zur Randverteilung von Y, $y \in \mathbb{R}$ eine Stetigkeitsstelle von f_Y mit $f_Y(y) > 0$. Dann heißt die durch die Dichtefunktion

$$f_{X|Y=y} : \mathbb{R} \to \mathbb{R}; f_{X|Y=y}(x) = \frac{f_{(X,Y)}(x,y)}{f_Y(y)}$$

definierte stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung **bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung von** X **unter der Bedingung** $Y = y$.
Analog nennt man für Stetigkeitsstellen $x \in \mathbb{R}$ von f_X mit $f_X(x) > 0$ die durch die Dichtefunktion

$$f_{Y|X=x} : \mathbb{R} \to \mathbb{R}; f_{Y|X=x}(y) = \frac{f_{(X,Y)}(x,y)}{f_X(x)}$$

definierte stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung **bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung von** Y **unter der Bedingung** $X = x$.

Bemerkungen I

- Mit den üblichen Bezeichnungen und Abkürzungen für zweidimensionale Zufallsvektoren mit endlichem Träger erhält man mit Definition 10.5 analog zu den bedingten Häufigkeiten bei zweidimensionalen Merkmalen

$$p_{X|Y=y_j}(x_i) = \frac{p_{ij}}{p_{\cdot j}} \qquad \text{und} \qquad p_{Y|X=x_i}(y_j) = \frac{p_{ij}}{p_{i\cdot}}$$

  für $i \in \{1, \ldots, k\}$ und $j \in \{1, \ldots, l\}$.
- Ebenfalls analog zur deskriptiven Statistik sind zwei Zufallsvariablen also genau dann stochastisch unabhängig, wenn die bedingten Verteilungen jeweils mit den zugehörigen Randverteilungen übereinstimmen, also wenn
  - im diskreten Fall $p_{X|Y=y}(x) = p_X(x)$ für alle $x \in \mathbb{R}$ und alle $y \in T(Y)$ sowie $p_{Y|X=x}(y) = p_Y(y)$ für alle $y \in \mathbb{R}$ und alle $x \in T(X)$ gilt.
  - im stetigen Fall (bedingte) Dichtefunktionen f_X, f_Y, $f_{Y|X=x}$, $f_{X|Y=y}$ existieren mit $f_{X|Y=y}(x) = f_X(x)$ für alle $x \in \mathbb{R}$ und alle Stetigkeitsstellen $y \in \mathbb{R}$ von f_Y mit $f_Y(y) > 0$ sowie $f_{Y|X=x}(y) = f_Y(y)$ für alle $y \in \mathbb{R}$ und alle Stetigkeitsstellen $x \in \mathbb{R}$ von f_X mit $f_X(x) > 0$.

Bemerkungen II

- Durch bedingte Dichtefunktionen $f_{X|Y=y}$ bzw. $f_{Y|X=x}$ oder bedingte Wahrscheinlichkeitsfunktionen $p_{X|Y=y}$ bzw. $p_{Y|X=x}$ definierte bedingte Verteilungen können *im weiteren Sinne* als Verteilungen eindimensionaler Zufallsvariablen $X|Y = y$ bzw. $Y|X = x$ aufgefasst werden.
- Damit lassen sich viele für eindimensionale Zufallsvariablen bekannten Methoden/Konzepte in natürlicher Weise übertragen, insbesondere auf
  - bedingte Verteilungsfunktionen $F_{X|Y=y}$ bzw. $F_{Y|X=x}$,
  - bedingte Wahrscheinlichkeitsmaße $P_{X|Y=y}$ bzw. $P_{Y|X=x}$,
  - bedingte Träger $T(X|Y = y)$ bzw. $T(Y|X = x)$,
  - bedingte Erwartungswerte $\mathrm{E}(X|Y = y)$ bzw. $\mathrm{E}(Y|X = x)$,
  - bedingte Varianzen $\mathrm{Var}(X|Y = y)$ bzw. $\mathrm{Var}(Y|X = x)$,
  - bedingte höhere Momente $m_k(X|Y = y)$ bzw. $m_k(Y|X = x)$,
  - bedingte zentrale höhere Momente $\mu_k(X|Y = y)$ bzw. $\mu_k(Y|X = x)$.
- Den bedingten Erwartungswert $\mathrm{E}(Y|X = x)$ erhält man zum Beispiel
  - im diskreten Fall durch: $\mathrm{E}(Y|X = x) = \sum_{y_i} y_i \cdot p_{Y|X=x}(y_i)$
  - im stetigen Fall durch: $\mathrm{E}(Y|X = x) = \int_{-\infty}^{+\infty} y \cdot f_{Y|X=x}(y) dy$
- Gültig bleibt auch der VZS: $\mathrm{Var}(X|Y = y) = \mathrm{E}(X^2|Y = y) - [\mathrm{E}(X|Y = y)]^2$