

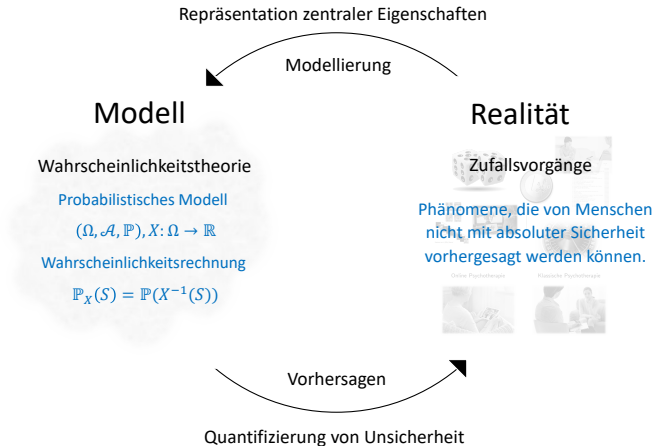


Wahrscheinlichkeitstheorie und Frequentistische Inferenz

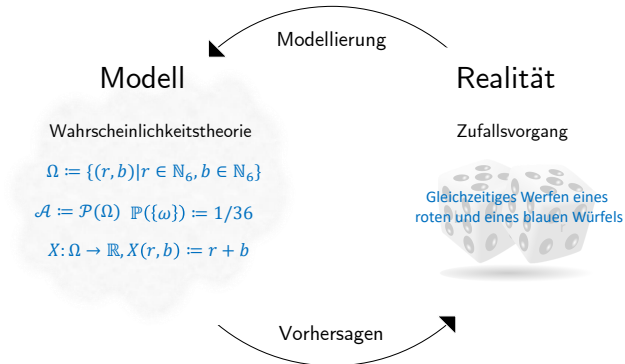
BSc Psychologie WiSe 2021/22

Prof. Dr. Dirk Ostwald

(4) Zufallsvariablen



Jedes Augenzahlpaar kommt im Mittel gleich häufig vor.
Basierend auf der Physik sollte jedes Augenzahlpaar die gleiche Wahrscheinlichkeit haben.



Die Summe der Augenzahlen ist eine Zufallsvariable mit Verteilung $\mathbb{P}_X$.

Konstruktion, Definition, Notation, Intuition

Wahrscheinlichkeitsmassefunktionen

Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen

Kumulative Verteilungsfunktionen

Selbstkontrollfragen

Konstruktion, Definition, Notation, Intuition

Wahrscheinlichkeitsmassefunktionen

Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen

Kumulative Verteilungsfunktionen

Selbstkontrollfragen

Konstruktion von Zufallsvariablen und Verteilungen

- Es seien $(\Omega, \mathcal{A}, \mathbb{P})$ ein Wahrscheinlichkeitsraum und $X : \Omega \rightarrow \mathcal{X}$ eine Abbildung.
- Es sei $\mathcal{S}$ eine σ -Algebra auf $\mathcal{X}$.
- Für jedes $S \in \mathcal{S}$ sei das *Urbild von S* definiert als

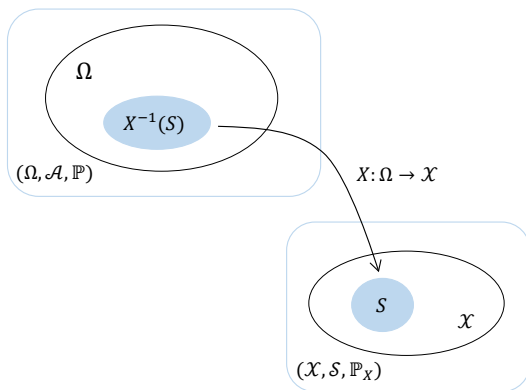
$$X^{-1}(S) := \{\omega \in \Omega | X(\omega) \in S\}. \quad (1)$$

- Wenn $X^{-1}(S) \in \mathcal{A}$ für alle $S \in \mathcal{S}$ gilt, dann heißt X *messbar*.
- $X : \Omega \rightarrow \mathcal{X}$ sei messbar. Allen $S \in \mathcal{S}$ kann die Wahrscheinlichkeit

$$\mathbb{P}_X : \mathcal{S} \rightarrow [0, 1], S \mapsto \mathbb{P}_X(S) := \mathbb{P}(X^{-1}(S)) = \mathbb{P}(\{\omega \in \Omega | X(\omega) \in S\}) \quad (2)$$

zugeordnet werden.

- X heißt nun *Zufallsvariable* und $\mathbb{P}_X$ heißt *Bildmaß* oder *Verteilung von X* .
- $(\mathcal{X}, \mathcal{S}, \mathbb{P}_X)$ ist ein Wahrscheinlichkeitsraum.
- Mit $\mathcal{X} := \mathbb{R}$ und $\mathcal{S} := \mathcal{B}(\mathbb{R})$ rückt der Wahrscheinlichkeitsraum $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}), \mathbb{P}_X)$ ins Zentrum.



$$\mathbb{P}(X^{-1}(S)) = \mathbb{P}(\{\omega \in \Omega | X(\omega) \in S\}) =: \mathbb{P}_X(S)$$

Definition (Zufallsvariable)

Es sei $(\Omega, \mathcal{A}, \mathbb{P})$ ein Wahrscheinlichkeitsraum und $(\mathcal{X}, \mathcal{S})$ ein *Messraum*. Eine *Zufallsvariable* (ZV) ist dann definiert als eine Abbildung $X : \Omega \rightarrow \mathcal{X}$ mit der *Messbarkeitseigenschaft*

$$\{\omega \in \Omega \mid X(\omega) \in S\} \in \mathcal{A} \text{ für alle } S \in \mathcal{S}. \quad (3)$$

Bemerkungen

- ZVen sind weder “zufällig” noch “Variablen”.
- Intuitiv wird $\omega \in \Omega$ “zufällig” anhand von $\mathbb{P}$ gezogen und $X(\omega)$ realisiert.
- Wir nennen $\mathcal{X}$ den *Ergebnisraum der ZV* X .
- Die Verteilungen (Bildmaße) von ZVen sind in der Statistik zentral.
- Der Begriff der Verteilung wird oft auch für W-Maße und Dichten verwendet.

Beispiel (Summe eines roten und eines blauen Würfels)

- Für das Werfen zweier Würfel ist ein sinnvolles Wahrscheinlichkeitsraum-Modell
 - $\Omega := \{(r, b) | r \in \mathbb{N}_6, b \in \mathbb{N}_6\}$
 - $\mathcal{A} := \mathcal{P}(\Omega)$.
 - $\mathbb{P} : \mathcal{A} \rightarrow [0, 1]$ mit $\mathbb{P}(\{(r, b)\}) = 1/36$ für alle $(r, b) \in \Omega$.
- Die Augenzahl-Summenbildung wird dann sinnvoller Weise durch die Zufallsvariable

$$X : \Omega \rightarrow \mathcal{X}, (r, b) \mapsto X((r, b)) := r + b. \quad (4)$$

beschrieben, wobei $\mathcal{X} := \{2, 3, \dots, 12\}$.

- $\mathcal{S} := \mathcal{P}(\mathcal{X})$ ist eine sinnvolle σ -Algebra auf $\mathcal{X}$.
- Mithilfe der σ -Additivität von $\mathbb{P}$ können wir die Verteilung $\mathbb{P}_X$ von X für alle Elementarereignisse $\{x\} \in \mathcal{S}$ berechnen, wie auf der nächsten Folie gezeigt.
- Wir haben damit ein weiteres Wahrscheinlichkeitsraum-Modell $(\mathcal{X}, \mathcal{S}, \mathbb{P}_X)$ konstruiert.

Beispiel (Summe zweier Würfel)

Bestimmung der Verteilung $\mathbb{P}_X$ von X

$$\begin{array}{llll} \mathbb{P}_X(\{2\}) & = \mathbb{P}\left(X^{-1}(\{2\})\right) & = \mathbb{P}(\{(1, 1)\}) & = \frac{1}{36} \\ \mathbb{P}_X(\{3\}) & = \mathbb{P}\left(X^{-1}(\{3\})\right) & = \mathbb{P}(\{(1, 2), (2, 1)\}) & = \frac{2}{36} \\ \mathbb{P}_X(\{4\}) & = \mathbb{P}\left(X^{-1}(\{4\})\right) & = \mathbb{P}(\{(1, 3), (3, 1), (2, 2)\}) & = \frac{3}{36} \\ \mathbb{P}_X(\{5\}) & = \mathbb{P}\left(X^{-1}(\{5\})\right) & = \mathbb{P}(\{(1, 4), (4, 1), (2, 3), (3, 2)\}) & = \frac{4}{36} \\ \mathbb{P}_X(\{6\}) & = \mathbb{P}\left(X^{-1}(\{6\})\right) & = \mathbb{P}(\{(1, 5), (5, 1), (2, 4), (4, 2), (3, 3)\}) & = \frac{5}{36} \\ \mathbb{P}_X(\{7\}) & = \mathbb{P}\left(X^{-1}(\{7\})\right) & = \mathbb{P}(\{(1, 6), (6, 1), (2, 5), (5, 2), (3, 4), (4, 3)\}) & = \frac{6}{36} \\ \mathbb{P}_X(\{8\}) & = \mathbb{P}\left(X^{-1}(\{8\})\right) & = \mathbb{P}(\{(2, 6), (6, 2), (3, 5), (5, 3), (4, 4)\}) & = \frac{5}{36} \\ \mathbb{P}_X(\{9\}) & = \mathbb{P}\left(X^{-1}(\{9\})\right) & = \mathbb{P}(\{(3, 6), (6, 3), (4, 5), (5, 4)\}) & = \frac{4}{36} \\ \mathbb{P}_X(\{10\}) & = \mathbb{P}\left(X^{-1}(\{10\})\right) & = \mathbb{P}(\{(4, 6), (6, 4), (5, 5)\}) & = \frac{3}{36} \\ \mathbb{P}_X(\{11\}) & = \mathbb{P}\left(X^{-1}(\{11\})\right) & = \mathbb{P}(\{(5, 6), (6, 5)\}) & = \frac{2}{36} \\ \mathbb{P}_X(\{12\}) & = \mathbb{P}\left(X^{-1}(\{12\})\right) & = \mathbb{P}(\{(6, 6)\}) & = \frac{1}{36} \end{array}$$

Definition (Notation für Zufallsvariablen)

Es seien $(\Omega, \mathcal{A}, \mathbb{P})$ und $(\mathcal{X}, \mathcal{S}, \mathbb{P}_X)$ W-Räume und $X : \Omega \rightarrow \mathcal{X}$ sei eine ZV. Dann gelten folgende Konventionen:

$$\{X \in S\} := \{\omega \in \Omega | X(\omega) \in S\}, S \subset \mathcal{X},$$

$$\{X = x\} := \{\omega \in \Omega | X(\omega) = x\}, x \in \mathcal{X},$$

$$\{X \leq x\} := \{\omega \in \Omega | X(\omega) \leq x\}, x \in \mathcal{X},$$

$$\{X < x\} := \{\omega \in \Omega | X(\omega) < x\}, x \in \mathcal{X}.$$

Aus diesen Konventionen folgen exemplarisch die folgenden Konventionen für Verteilungen:

$$\mathbb{P}_X(X \in S) = \mathbb{P}(\{X \in S\}) = \mathbb{P}(\{\omega \in \Omega | X(\omega) \in S\}), S \subset \mathcal{X}$$

$$\mathbb{P}_X(X \leq x) = \mathbb{P}(\{X \leq x\}) = \mathbb{P}(\{\omega \in \Omega | X(\omega) \leq x\}), x \in \mathcal{X}.$$

Oft wird zudem auf das ZV Subskript bei Verteilungssymbolen verzichtet, z.B.

$$\mathbb{P}(X \in S) = \mathbb{P}_X(X \in S), S \subset \mathcal{X},$$

$$\mathbb{P}(X \leq x) = \mathbb{P}_X(X \leq x), x \in \mathcal{X}.$$

Definition (Realisierungen von Zufallsvariablen und Datenpunkte)

Der einzelne Wert, den eine Zufallsvariable in einem Durchgang eines Zufallsvorgangs annimmt, heißt eine *Realisierung der Zufallsvariable*. In der probabilistischen Datenanalyse wird jeder beobachtete *Datenpunkt* als eine Realisierung einer Zufallsvariablen betrachtet.

Simulation von Zufallsvariablenrealisierungen

```
# Wahrscheinlichkeitsraummodell
Omega = 1:6
pi = rep(1,6)/6

# Ergebnisraum
# Wahrscheinlichkeitsfunktion

# 1. Durchgang des Zufallsvorgangs
rb = c(Omega[rmultinom(1,1,rep(1,6)/6) == 1], # Realisierung roter Würfel
        Omega[rmultinom(1,1,rep(1,6)/6) == 1]) # Realisierung blauer Würfel
X = sum(rb) # Realisierung der Zufallsvariable X
print(rb)
```

```
> [1] 2 6
```

```
print(X)
```

```
> [1] 8
```

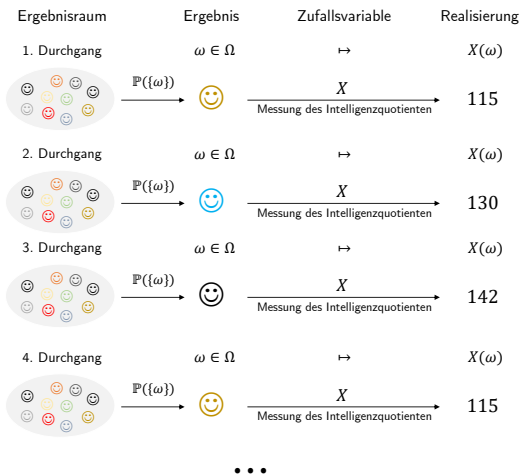
```
# 2. Durchgang des Zufallsvorgangs
rb = c(Omega[rmultinom(1,1,rep(1,6)/6) == 1], # Realisierung roter Würfel
        Omega[rmultinom(1,1,rep(1,6)/6) == 1]) # Realisierung blauer Würfel
X = sum(rb) # Realisierung der Zufallsvariable X
print(rb)
```

```
> [1] 3 1
```

```
print(X)
```

```
> [1] 4
```

Zufallsvariablen als Modelle von Messvorgängen



Konstruktion, Definition, Notation, Intuition

Wahrscheinlichkeitsmassefunktionen

Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen

Kumulative Verteilungsfunktionen

Selbstkontrollfragen

Definition (Diskrete ZV, Wahrscheinlichkeitsmassefunktion)

Eine Zufallsvariable X heißt *diskret*, wenn ihr Ergebnisraum $\mathcal{X}$ endlich oder abzählbar ist. Die *Wahrscheinlichkeitsmassefunktion* (WMF) einer diskreten ZV ist definiert als

$$p : \mathcal{X} \rightarrow [0, 1], x \mapsto p(x) := \mathbb{P}_X(X = x). \quad (5)$$

Bemerkungen

- Eine Menge heißt abzählbar, wenn sie bijektiv auf $\mathbb{N}$ abgebildet werden kann.
- WMFen sind nicht-negativ, d.h. $p(x) \geq 0$ für alle $x \in \mathcal{X}$.
- WMFen sind normiert, d.h. $\sum_{x \in \mathcal{X}} p(x) = 1$.
- WMFen heißen im Deutschen üblicherweise *W-Funktionen* oder *Zähldichten*.
- WMFen heißen auf Englisch *probability mass functions* (PMFs).
- Zur Parallelität mit PMFs und WDFs bevorzugen wird den Begriff WMF.

Definition (Bernoulli-Zufallsvariable)

Es sei X eine Zufallsvariable mit Ergebnisraum $\mathcal{X} = \{0, 1\}$ und WMF

$$p : \mathcal{X} \rightarrow [0, 1], x \mapsto p(x) := \mu^x (1 - \mu)^{1-x} \text{ mit } \mu \in [0, 1]. \quad (6)$$

Dann sagen wir, dass X einer *Bernoulli-Verteilung mit Parameter* $\mu \in [0, 1]$ unterliegt und nennen X eine *Bernoulli-Zufallsvariable*. Wir kürzen dies mit $X \sim \text{Bern}(\mu)$ ab. Die WMF einer Bernoulli-Zufallsvariable bezeichnen wir mit

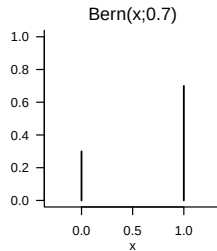
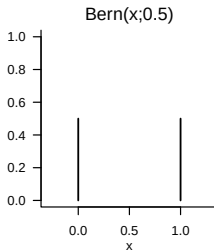
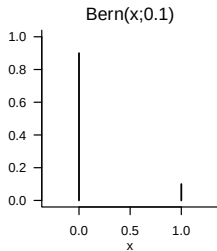
$$\text{Bern}(x; \mu) := \mu^x (1 - \mu)^{1-x}. \quad (7)$$

Bemerkungen

- Eine Bernoulli-Zufallsvariable kann als Modell eines Münzwurfs dienen.
- μ ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass X den Wert 1 annimmt,

$$\mathbb{P}(X = 1) = \mu^1 (1 - \mu)^{1-1} = \mu. \quad (8)$$

Bernoulli-Zufallsvariable



Definition (Diskret-gleichverteilte Zufallsvariable)

Es sei X eine diskrete Zufallsvariable mit Ergebnisraum $\mathcal{X}$ und WMF

$$p : \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}, x \mapsto p(x) := \frac{1}{|\mathcal{X}|}. \quad (9)$$

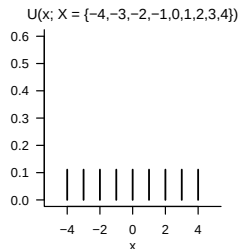
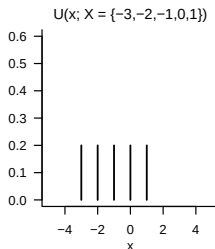
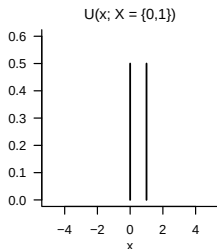
Dann sagen wir, dass X einer *diskreten Gleichverteilung* unterliegt und nennen X eine *diskret-gleichverteilte Zufallsvariable*. Wir kürzen dies mit $X \sim U(|\mathcal{X}|)$ ab. Die WMF einer diskret-gleichverteilten Zufallsvariable bezeichnen wir mit

$$U(x; |\mathcal{X}|) := \frac{1}{|\mathcal{X}|}. \quad (10)$$

Bemerkungen

- $\text{Bern}(x; 0.5) = U(x; |\mathcal{X}|)$ für $\mathcal{X} = \{0, 1\}$.

Diskret-gleichverteilte Zufallsvariable



Konstruktion, Definition, Notation, Intuition

Wahrscheinlichkeitsmassefunktionen

Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen

Kumulative Verteilungsfunktionen

Selbstkontrollfragen

Definition (Kontinuierliche ZV, Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion)

Eine Zufallsvariable X heißt *kontinuierlich*, wenn eine Funktion

$$p : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}, x \mapsto p(x) \quad (11)$$

existiert, so dass gilt

- $p(x) \geq 0$ für alle $x \in \mathbb{R}$,
- $\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1$,
- $\mathbb{P}_X(a \leq X \leq b) = \int_a^b p(x) dx$ für alle $a, b \in \mathbb{R}, a \leq b$.

Eine entsprechende Funktion p heißt *Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF)* von X .

Bemerkungen

- WDFen können Werte größer als 1 annehmen.
- Es gilt $\mathbb{P}_X(X = a) = \int_a^a p(x) dx = 0$.
- Wahrscheinlichkeiten werden aus WDFen durch Integration berechnet.
- (Wahrscheinlichkeits)Masse = (Wahrscheinlichkeits)Dichte $\times$ (Mengen)Volumen.

Definition (Normalverteilte und standardnormalverteilte Zufallsvariablen)

Es sei X eine Zufallsvariable mit Ergebnisraum $\mathbb{R}$ und WDF

$$p : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_{>0}, x \mapsto p(x) := \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(x - \mu)^2\right). \quad (12)$$

Dann sagen wir, dass X einer *Normalverteilung (oder Gauß-Verteilung)* mit Parametern $\mu \in \mathbb{R}$ und $\sigma^2 > 0$ unterliegt und nennen X eine *normalverteilte Zufallsvariable*. Wir kürzen dies mit $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ ab. Die WDF einer normalverteilten Zufallsvariable bezeichnen wir mit

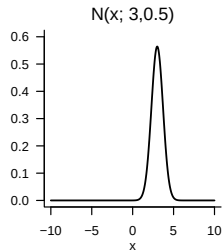
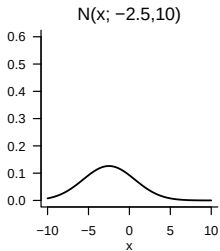
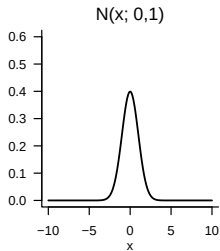
$$N(x; \mu, \sigma^2) := \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(x - \mu)^2\right). \quad (13)$$

Eine normalverteilte Zufallsvariable mit $\mu = 0$ und $\sigma^2 = 1$ heißt *standardnormalverteilte Zufallsvariable* und wird oft als *Z-Zufallsvariable* bezeichnet.

Bemerkungen

- Der Parameter μ entspricht dem Wert höchster Wahrscheinlichkeitsdichte.
- Der Parameter σ^2 spezifiziert die Breite der WDF.

Normalverteilte Zufallsvariablen



Definition (Gamma-Zufallsvariable)

Es sei X eine Zufallsvariable mit Ergebnisraum $\mathcal{X} := \mathbb{R}_{>0}$ und WDF

$$p : \mathbb{R}_{>0} \rightarrow \mathbb{R}_{>0}, x \mapsto p(x) := \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right), \quad (14)$$

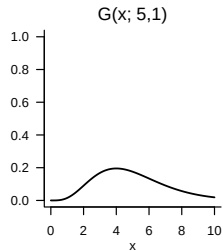
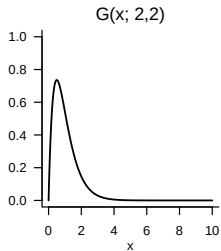
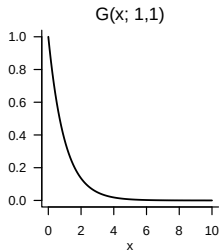
wobei Γ die Gammafunktion bezeichne. Dann sagen wir, dass X einer *Gammaverteilung mit Formparameter $\alpha > 0$ und Skalenparameter $\beta > 0$* unterliegt und nennen X eine *gammaverteilte Zufallsvariable*. Wir kürzen dies mit $X \sim G(\alpha, \beta)$ ab. Die WDF einer gammaverteilten Zufallsvariable bezeichnen wir mit

$$G(x; \alpha, \beta) := \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right). \quad (15)$$

Bemerkung

- $G\left(\frac{n}{2}, 2\right)$ heißt auch *Chi-Quadrat (χ^2) Verteilung mit n Freiheitsgraden*.

Gamma-Zufallsvariablen



Definition (Beta-Zufallsvariable)

Es sei X eine Zufallsvariable mit Ergebnisraum $\mathcal{X} := [0, 1]$ und WDF

$$p : \mathcal{X} \rightarrow [0, 1], x \mapsto p(x) := \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} \text{ mit } \alpha, \beta \in \mathbb{R}_{>0}, \quad (16)$$

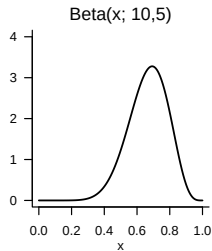
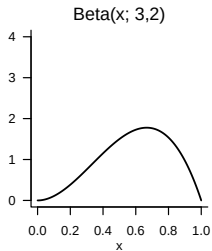
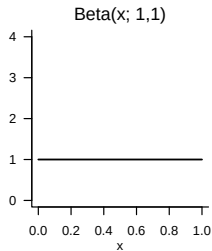
wobei Γ die Gammafunktion bezeichne. Dann sagen wir, dass X einer *Beta-Verteilung* mit Parametern $\alpha > 0$ und $\beta > 0$ unterliegt, und nennen X eine *beta-verteilte Zufallsvariable*. Wir kürzen dies mit $X \sim \text{Beta}(\alpha, \beta)$ ab. Die WDF einer beta-verteilten Zufallsvariable bezeichnen wir mit

$$\text{Beta}(x; \alpha, \beta) := \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}. \quad (17)$$

Bemerkung

- Für $\alpha < 1, \beta < 1$ ist der Ergebnisraum $\mathcal{X} :=]0, 1[$.

Beta-Zufallsvariable



Definition (Gleichverteilte Zufallsvariable)

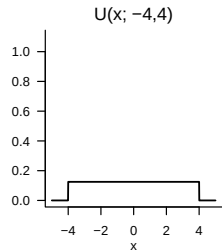
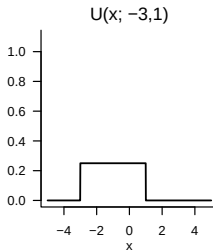
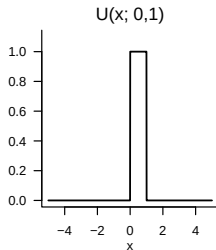
Es sei X eine kontinuierliche Zufallsvariable mit Ergebnisraum $\mathbb{R}$ und WDF

$$p : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}, x \mapsto p(x) := \begin{cases} \frac{1}{b-a} & x \in [a, b] \\ 0 & x \notin [a, b] \end{cases}. \quad (18)$$

Dann sagen wir, dass X einer *Gleichverteilung mit Parametern a und b* unterliegt und nennen X eine *gleichverteilte Zufallsvariable*. Wir kürzen dies mit $X \sim U(a, b)$ ab. Die WDF einer gleichverteilten Zufallsvariable bezeichnen wir mit

$$U(x; a, b) := \frac{1}{b-a}. \quad (19)$$

Gleichverteilte Zufallsvariablen



Konstruktion, Definition, Notation, Intuition

Wahrscheinlichkeitsmassefunktionen

Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen

Kumulative Verteilungsfunktionen

Selbstkontrollfragen

Definition (Kumulative Verteilungsfunktion)

Die *kumulative Verteilungsfunktion (KVF)* einer Zufallsvariable X ist definiert als

$$P : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1], x \mapsto P(x) := \mathbb{P}(X \leq x). \quad (20)$$

Bemerkungen

- KVFe sind sowohl für diskrete als auch kontinuierliche ZVen definiert.
- $P(x)$ ist für jedes $x \in \mathbb{R}$ definiert, auch wenn $x \notin \mathcal{X}$.
- Mithilfe von KVFe können Intervallwahrscheinlichkeiten angegeben werden

Theorem (Überschreitungswahrscheinlichkeit)

Es sei X eine Zufallsvariable mit Ereignisraum $\mathcal{X}$ und P ihre kumulative Verteilungsfunktion. Dann gilt für die *Überschreitungswahrscheinlichkeit* $\mathbb{P}(X > x)$, dass

$$\mathbb{P}(X > x) = 1 - P(x) \text{ für alle } x \in \mathcal{X}. \quad (21)$$

Beweis

Die Ereignisse $\{X > x\}$ und $\{X \leq x\}$ sind disjunkt und

$$\Omega = \{\omega \in \Omega | X(\omega) > x\} \cup \{\omega \in \Omega | X(\omega) \leq x\} = \{X > x\} \cup \{X \leq x\}. \quad (22)$$

Mit der σ -Additivität von $\mathbb{P}$ folgt dann

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(\Omega) &= 1 \\ \Leftrightarrow \mathbb{P}(\{X > x\} \cup \{X \leq x\}) &= 1 \\ \Leftrightarrow \mathbb{P}(\{X > x\}) + \mathbb{P}(\{X \leq x\}) &= 1 \\ \Leftrightarrow \mathbb{P}(\{X > x\}) &= 1 - \mathbb{P}(\{X \leq x\}) \\ \Leftrightarrow \mathbb{P}(\{X > x\}) &= 1 - P(x). \end{aligned} \quad (23)$$

□

Theorem (Intervallwahrscheinlichkeiten)

Es sei X eine Zufallsvariable mit Ereignisraum $\mathcal{X}$ und P ihre kumulative Verteilungsfunktion. Dann gilt für die *Intervallwahrscheinlichkeit* $\mathbb{P}(X \in]x_1, x_2])$, dass

$$\mathbb{P}(X \in]x_1, x_2]) = P(x_2) - P(x_1) \text{ für alle } x_1, x_2 \in \mathcal{X} \text{ mit } x_1 < x_2. \quad (24)$$

Beweis

Wir betrachten die Ereignisse $\{X \leq x_1\}$, $\{x_1 < X \leq x_2\}$ und $\{X \leq x_2\}$, wobei

$$\{X \leq x_1\} \cap \{x_1 < X \leq x_2\} = \emptyset \text{ und } \{X \leq x_1\} \cup \{x_1 < X \leq x_2\} = \{X \leq x_2\}. \quad (25)$$

gelten. Mit der σ -Additivität von $\mathbb{P}$ gilt dann

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(\{X \leq x_1\} \cup \{x_1 < X \leq x_2\}) &= \mathbb{P}(\{X \leq x_2\}) \\ \Leftrightarrow \mathbb{P}(\{X \leq x_1\}) + \mathbb{P}(\{x_1 < X \leq x_2\}) &= \mathbb{P}(\{X \leq x_2\}) \\ \Leftrightarrow \mathbb{P}(\{x_1 < X \leq x_2\}) &= \mathbb{P}(\{X \leq x_2\}) - \mathbb{P}(\{X \leq x_1\}) \\ \Leftrightarrow \mathbb{P}(\{x_1 < X \leq x_2\}) &= P(x_2) - P(x_1) \\ \Leftrightarrow \mathbb{P}(X \in]x_1, x_2]) &= P(x_2) - P(x_1). \end{aligned} \quad (26)$$

□

Theorem (Eigenschaften von kumulative Verteilungsfunktionen)

Es sei X eine Zufallsvariable und P ihre kumulative Verteilungsfunktion. Dann hat P die folgenden Eigenschaften

- (1) P ist *monoton steigend*, i.e., wenn $x_1 < x_2$, dann gilt $P(x_1) \leq P(x_2)$.
- (2) $\lim_{x \rightarrow -\infty} P(x) = 0$ und $\lim_{x \rightarrow \infty} P(x) = 1$.
- (3) P ist *rechtsseitig stetig*, d.h., $P(x) = P(x^+) = \lim_{y \rightarrow x, y > x} P(y)$ für alle $x \in \mathbb{R}$

Bemerkungen

- Die genannten Eigenschaften können auch zur Definition einer KVF genutzt werden.
- (3) $\Leftrightarrow$ Eine KVF hat keine Sprünge, wenn man sich Grenzpunkten von rechts nähert.

Beweis

- (1) Wir halten zunächst fest, dass für Ereignisse $A \subset B$ gilt, dass $\mathbb{P}(A) \leq \mathbb{P}(B)$. Wie halten dann fest, dass für $x_1 < x_2$,

$$\{X \leq x_1\} = \{\omega \in \Omega | X(\omega) \leq x_1\} \subset \{\omega \in \Omega | X(\omega) \leq x_2\} = \{X \leq x_2\} \quad (27)$$

Also gilt

$$\mathbb{P}(\{X \leq x_1\}) \leq \mathbb{P}\{X \leq x_2\} \Rightarrow P(x_1) \leq P(x_2). \quad (28)$$

- (2) Wir verzichten auf einen Beweis

- (3) Wir definieren

$$P(x^+) = \lim_{y \rightarrow x, y > x} P(y). \quad (29)$$

Seien nun $y_1 > y_2 > \dots$ so, dass $\lim_{n \rightarrow \infty} y_n = x$. Dann gilt

$$\{X \leq x\} = \cap_{n=1}^{\infty} \{X \leq y_n\}. \quad (30)$$

Es gilt also

$$P(x) = \mathbb{P}(\{X \leq x\}) = \mathbb{P}(\cap_{n=1}^{\infty} \{X \leq y_n\}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{P}(\{X \leq y_n\}) = P(x^+), \quad (31)$$

wobei wir die dritte Gleichung unbegründet stehen lassen.

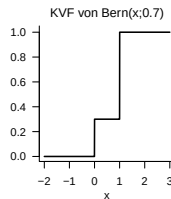
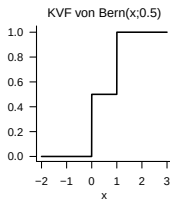
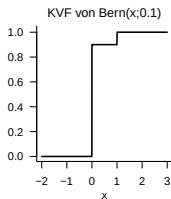
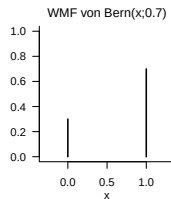
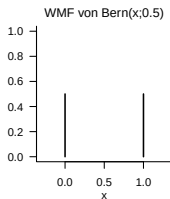
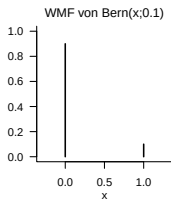
Kumulative Verteilungsfunktionen von diskreten Zufallsvariablen

- Wenn $a < b$ und $\mathbb{P}(a < X < b) = 0$, dann ist P konstant horizontal auf $]a, b[$.
- An jedem Punkt x mit $\mathbb{P}(X = x) > 0$ springt die KVF um den Betrag $\mathbb{P}(X = x)$.
- $\Leftrightarrow$ An jedem Punkt x mit $p(x) > 0$ springt die KVF um den Betrag $p(x) > 0$.
- Generell ist die KVF einer diskreten Zufallsvariable mit Ergebnisraum $\mathbb{N}_0$ durch

$$P : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1], x \mapsto P(x) := \sum_{k=0}^{\lfloor x \rfloor} \mathbb{P}(X = k) \quad (32)$$

gegeben, wobei $\lfloor x \rfloor$ die Abrundungsfunktion bezeichnet.

Bernoulli-Zufallsvariablen



Theorem (Kumulative Verteilungsfunktionen von kontinuierlichen ZVen)

X sei eine kontinuierliche Zufallsvariable mit WDF p und KVF P . Dann gilt

$$P(x) = \int_{-\infty}^x p(t) dt \text{ und } p(x) = \frac{d}{dx} P(x). \quad (33)$$

Beweis

Wir halten zunächst fest, dass weil $\mathbb{P}(X = x) = 0$ für alle $x \in \mathbb{R}$ gilt, die KVF von X keine Sprünge hat, d.h. P ist stetig. Mit der Definitionen von WDF und KVF, folgt, dass P die Form einer Stammfunktion von p hat. Dass p die Ableitung von P ist, folgt dann unmittelbar aus dem Fundamentalsatz der Analysis.

□

Bemerkungen

- Die KVF ist eine Stammfunktion der WDF, die WDF ist die Ableitung der KVF.
- Das *Theorem von Radon-Nikodym* ist eine generalisierte Variante dieser Einsicht.
- KVFe von kontinuierlichen ZV heißen auch kumulative Dichtefunktionen (KDFen).

Beispiel (Normalverteilung)

Es sei $X \sim N(\mu, \sigma^2)$.

- Die WDF von X ist

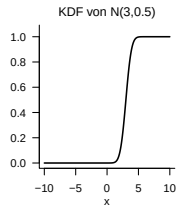
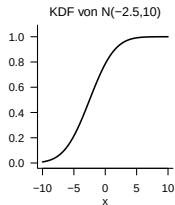
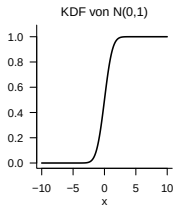
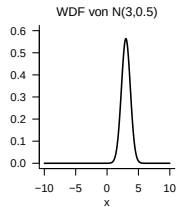
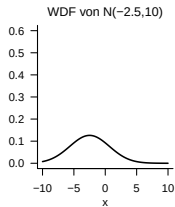
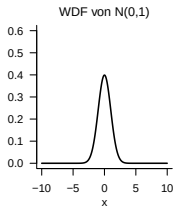
$$p : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_{>0}, x \mapsto p(x) := \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(x - \mu)^2\right).$$

- Die KVF von X ist

$$P : \mathbb{R} \rightarrow]0, 1[, x \mapsto P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(\xi - \mu)^2\right) d\xi.$$

- Die KVF von $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ kann nur numerisch, nicht analytisch, berechnet werden.
- Für $\mu = 1, \sigma^2 = 1$, gilt zum Beispiel $p(2) = 0.24$ und $P(2) = 0.84$.
- Die WDF und KVF von $Z \sim N(0, 1)$ werden oft mit ϕ und Φ , respektive, bezeichnet.

Normalverteilte Zufallsvariablen



Definition (Inverse Kumulative Verteilungsfunktion)

X sei eine kontinuierliche Zufallsvariable mit KVF P . Dann heißt die Funktion

$$P^{-1} :]0, 1[\rightarrow \mathbb{R}, q \mapsto P^{-1}(q) := \{x \in \mathbb{R} | P(x) = q\} \quad (34)$$

die *inverse kumulative Verteilungsfunktion* von X .

Bemerkungen

- P^{-1} ist die Inverse von P , d.h. $P^{-1}(P(x)) = x$.
- Offenbar gilt $P(x) = q \Leftrightarrow \mathbb{P}(X \leq x) = q$.
- Für $q \in]0, 1[$ ist also $P^{-1}(q)$ der Wert x von X , so dass $\mathbb{P}(X \leq x) = q$ gilt.
- Wenn $Z \sim N(0, 1)$ mit KVF Φ ist, dann gilt zum Beispiel $\Phi^{-1}(0.975) = 1.960$.

Beispiel (Normalverteilung)

Es sei $X \sim N(\mu, \sigma^2)$.

- Die KVF von X ist

$$P : \mathbb{R} \rightarrow]0, 1[, x \mapsto \mathbb{P}(X \leq x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(\xi - \mu)^2\right) d\xi \quad (35)$$

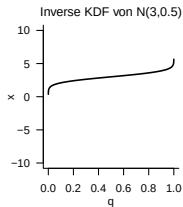
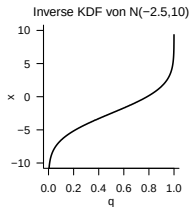
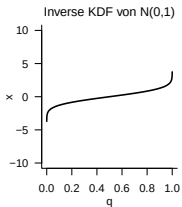
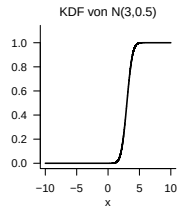
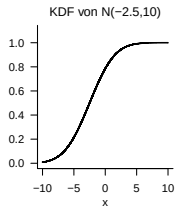
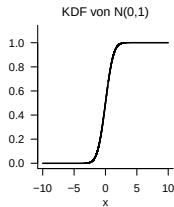
- Die inverse KVF von X ist

$$P^{-1} :]0, 1[\rightarrow \mathbb{R}, q \mapsto P^{-1}(q) = \{x \in \mathbb{R} | P(x) = q\}. \quad (36)$$

- Für $\mu = 1, \sigma^2 = 1$ gilt z.B., dass $P(2) = 0.84$ und $P^{-1}(0.84) = 2$.
- Die inverse KVF von $X \sim N(0, 1)$ wird oft mit Φ^{-1} bezeichnet.
- Typische Beispielwerte für die KVF und inverse KVF von $N(0, 1)$ sind
 - $\Phi(1.645) = 0.950, \Phi^{-1}(0.950) = \Phi^{-1}(1 - 0.050) = 1.645$.
 - $\Phi(1.960) = 0.975, \Phi^{-1}(0.975) = \Phi^{-1}(1 - \frac{0.050}{2})$.

Kumulative Verteilungsfunktionen

Normalverteilte Zufallsvariablen



Konstruktion, Definition, Notation, Intuition

Wahrscheinlichkeitsmassefunktionen

Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen

Kumulative Verteilungsfunktionen

Selbstkontrollfragen

1. Definieren Sie den Begriff der Zufallsvariable.
2. Erläutern Sie die Gleichung $\mathbb{P}_X(X = x) = \mathbb{P}(\{X = x\})$.
3. Erläutern Sie die Bedeutung von $\mathbb{P}(X = x)$.
4. Definieren Sie den Begriff der Wahrscheinlichkeitsmassefunktion.
5. Definieren Sie die Begriffe der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion.
6. Definieren Sie den Begriff der kumulativen Verteilungsfunktion.
7. Schreiben sie die Intervallwahrscheinlichkeit einer Zufallsvariable mithilfe ihrer KVF.
8. Definieren Sie die WDF und KVF einer normalverteilten Zufallsvariable.
9. Schreiben Sie den Wert $P(x)$ der KVF einer Zufallsvariable mithilfe ihrer WDF.
10. Schreiben Sie den Wert $p(x)$ der WDF einer Zufallsvariable mithilfe ihrer KVF.
11. Definieren Sie den Begriff der inversen Verteilungsfunktion.