

Autor:

André Gasser, gassera@student.ethz.ch

Datum:

Januar 2013

1 Kombinatorik

1.1 Permutation

n unterschiedlichen Kugeln:

$$P(n) = n!$$

n unterschiedliche Kugeln mit n_1, n_2, \dots, n_k gleichen Kugeln:

$$P(n, n_1, n_2, \dots, n_k) = \frac{n!}{n_1! n_2! \dots n_k!}$$

Bemerkungen:

- Ermitteln der Anzahl Anordnungen.

1.2 Kombination

Mit Zurücklegen:

$$C_w(n, k) = \binom{n+k-1}{k} = \frac{(n+k-1)!}{k!(n-1)!}$$

Ohne Zurücklegen:

$$C(n, k) = \binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

Bemerkungen:

- Reihenfolge spielt keine Rolle.

1.3 Variation

Mit Zurücklegen:

$$V_w(n, k) = n^k$$

Ohne Zurücklegen:

$$V(n, k) = \frac{n!}{(n-k)!}$$

Bemerkungen:

- Reihenfolge ist wesentlich.

2 Wahrscheinlichkeit

2.1 Allgemeine Rechenregeln

$$\begin{aligned} P[A^C] &= 1 - P[A] \\ P[\Omega] &= P[A] + P[A^C] = 1 \\ P[\emptyset] &= 0 \\ P[B^C|A] &= 1 - P[B|A] \\ A \subseteq B &\Rightarrow P[A] \leq P[B] \end{aligned}$$

2.2 DeMorgan'sche Gesetze

$$\begin{aligned} \overline{A \cap B} &= \overline{A} \cup \overline{B} \\ \overline{A \cup B} &= \overline{A} \cap \overline{B} \end{aligned}$$

2.3 Additionssatz

Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit, dass Ereignis A oder B eintritt.

Allgemein:

$$P[A \cup B] = P[A] + P[B] - P[A \cap B]$$

A, B disjunkt:

$$P[A \cup B] = P[A] + P[B]$$

Bemerkungen:

- Wenn die Ereignisse nicht offensichtlich disjunkt sind, die **erste Formel verwenden!**

2.4 Multiplikationssatz

Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit, dass die Ereignisse A und B eintreten.

$$P[A \cap B] = P[A] \cdot P[B|A]$$

Bemerkungen

- $P[A, B] = P[A \cap B]$.

2.5 Bedingte Wahrscheinlichkeit

Die bedingte Wahrscheinlichkeit von B gegeben A entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass B eintritt, wenn man schon weiss, dass A eingetreten ist. Es gilt:

$$P[B|A] = \frac{P[A \cap B]}{P[A]}$$

$$P[A \cap B] = P[A] \cdot P[B|A] = P[B] \cdot P[A|B]$$

Bemerkungen:

- Die **Pfadregel**, nach der Wahrscheinlichkeiten in einem **Wahrscheinlichkeitsbaum** multipliziert werden, um die Wahrscheinlichkeit eines Blattes zu erhalten, entspricht einer Verkettung bedingter Wahrscheinlichkeiten.

2.5.1 Satz der totalen Wahrscheinlichkeit

$$P[B] = \sum_{i=1}^n P[A_i] \cdot P[B|A_i]$$

2.5.2 Satz von Bayes

Zur Berechnung einer bestimmten Zwischenstation A_k in einem Ereignisbaum, wobei mehrere Ereignisse A_i zu Ereignis B führen.

$$P[A_k|B] = \frac{P[A_k] \cdot P[B|A_k]}{\sum_{i=1}^n P[A_i] \cdot P[B|A_i]}$$

2.6 Eigenschaften von Ereignissen

2.6.1 Unabhängigkeit

Wenn zwischen zwei Ereignissen A und B kein kausaler Zusammenhang besteht (d.h. es gibt keine gemeinsamen Ursachen oder Ausschlüsse), dann sind sie *unabhängig* voneinander. In diesem Fall gilt:

$$P[A \cap B] = P[A] \cdot P[B]$$

3 Zufallsvariablen

3.1 Diskrete Zufallsvariablen

3.1.1 Gewichtsfunktion

Die Summe aller Gewichte ist immer 1 und die Werte immer im Intervall $[0,1]$:

$$\sum_{i=1}^{\infty} f(x) = 1$$

3.1.2 Verteilungsfunktion

3.2 Stetige Zufallsvariablen

3.2.1 Dichtefunktion

Die Fläche unter der Dichtefunktion ist immer 1 und die Werte immer im Intervall $[0,1]$:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$$

Bemerkungen

- Durch Integrieren der Dichtefunktion erhält man die Verteilungsfunktion.

3.2.2 Verteilungsfunktion

$$F(x) = P[X \leq x] = \int_{-\infty}^x f(u) du$$

Bemerkungen

- Durch Ableiten der Verteilungsfunktion erhält man die Dichtefunktion.

3.3 Gemeinsame Verteilungen

...

3.4 Funktionen diskreter Zufallsvariablen

3.4.1 Summe von Zufallsvariablen

...

3.4.2 Produkte von Zufallsvariablen

...

3.5 Funktionen stetiger Zufallsvariablen

$$\begin{aligned} Y = aX + b &= F_Y(t) = P[Y \leq t] = P[aX + b \leq t] \\ &= P[X \leq \frac{t-b}{a}] = F_X(\frac{t-b}{a}) \\ Y = X^2 &= F_Y(t) = P[Y \leq t] = P[X^2 \leq t] \\ &= P[-\sqrt{t} \leq X \leq \sqrt{t}] = F_X(\sqrt{t}) - F_X(-\sqrt{t}) \\ Y = \frac{1}{X} &= F_Y(t) = P[Y \leq t] = P[\frac{1}{X} \leq t] \\ &= P[X \geq \frac{1}{t}] = 1 - P[X \leq \frac{1}{t}] = 1 - F_X(\frac{1}{t}) \end{aligned}$$

3.6 Chebyshev-Ungleichung

Die Chebyshev-Ungleichung liefert eine Abschätzung von Wahrscheinlichkeiten, auch wenn die genaue Verteilungsfunktion nicht bekannt ist. Es muss nur der Erwartungswert $E[X]$ und die Varianz $Var[X] < \infty$ einer Zufallsvariablen X bekannt sein, dann gilt für jedes $k > 0$:

$$P[|X - E[X]| \geq k] \leq \frac{Var[X]}{k^2}$$

3.7 Eigenschaften von Zufallsvariablen

3.7.1 Unabhängigkeit

Zwei Zufallsvariablen X und Y heissen unabhängig, wenn stets gilt

$$\begin{aligned} F(x, y) &= F_X(x) \cdot F_Y(y) \\ f(x, y) &= f_X(x) \cdot f_Y(y) \end{aligned}$$

wobei $F_X(x), F_Y(y)$ die Verteilungsfunktionen und $f_X(x), f_Y(y)$ die Gewichts- bzw. Dichtefunktionen von X und Y sind.

3.7.2 Unkorreliert

Zwei Zufallsvariablen X und Y heissen *unkorreliert*, falls gilt $Cov(X, Y) = 0$.

Eine Menge von Zufallsvariablen X_1, X_2, \dots, X_n heissen *paarweise unkorreliert*, wenn alle Paare X_i, X_j mit $i \neq j$ unkorreliert sind.

3.8 Erwartungswert

Der Erwartungswert ist das langfristige Durchschnittsergebnis bei einem Zufallsexperiment mit vielen Wiederholungen.

Diskrete Verteilung:

$$E[X] = \sum_i x_i \cdot f(x_i)$$

Stetige Verteilung:

$$E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x) dx$$

3.8.1 Additionssatz für Erwartungswerte

Der Erwartungswert einer aus n (diskreten oder stetigen) Zufallsvariablen X_1, X_2, \dots, X_n gebildeten Summe

$$Z = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n$$

ist gleich der Summe der Erwartungswerte der einzelnen Zufallsvariablen:

$$E[Z] = a_1 E[X_1] + a_2 E[X_2] + \dots + a_n E[X_n]$$

3.8.2 Multiplikationssatz für Erwartungswerte

Der Erwartungswert eines aus n *stochastisch unabhängigen* (diskreten oder stetigen) Zufallsvariablen X_1, X_2, \dots, X_n gebildeten Produkts

$$Z = X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_n$$

ist gleich dem Produkt der Erwartungswerte der einzelnen Zufallsvariablen:

$$E[Z] = E[X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_n] = E[X_1] \cdot E[X_2] \cdot \dots \cdot E[X_n]$$

3.8.3 Formeln für 2. Moment

Dieses wird z.B. für die Momenten-Methode und zur Berechnung der Varianz benötigt.

Diskrete Verteilung:

$$E[X^2] = \sum_i x_i^2 \cdot f(x_i)$$

Stetige Verteilung:

$$E[X^2] = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 \cdot f(x) dx$$

3.8.4 Weitere Rechenregeln

$$\begin{aligned} E[a] &= a \text{ (für } a = \text{const.)} \\ E[aX] &= a \cdot E[X] \text{ (für } a = \text{const.)} \\ E[aX + b] &= a \cdot E[X] + b \\ E[E[X]] &= E[X] \end{aligned}$$

3.9 Varianz

Die Varianz ist ein Streuungsmass, also ein Mass für die Abweichung einer Zufallsvariable von ihrem Erwartungswert.

Diskrete Verteilung:

$$Var[X] = \sum_i (x_i - E[X])^2 \cdot f(x_i)$$

Stetige Verteilung:

$$Var[X] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - E[X])^2 \cdot f(x) dx$$

Vereinfachte Berechnung:

$$Var[X] = E[X^2] - E[X]^2$$

3.9.1 Additionssatz für Varianzen

Die Varianz einer aus n *stochastisch unabhängigen* (diskreten oder stetigen) Zufallsvariablen X_1, X_2, \dots, X_n gebildeten Summe

$$Z = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n$$

ist gleich der Summe der Varianzen der einzelnen Zufallsvariablen:

$$Var[Z] = a_1^2 Var[X_1] + a_2^2 Var[X_2] + \dots + a_n^2 Var[X_n]$$

3.9.2 Weitere Rechenregeln

$$\begin{aligned} Var[aX + b] &= a^2 \cdot Var[X] \\ Var[aX + bY] &= a^2 \cdot Var[X] + b^2 \cdot Var[Y] + 2ab \cdot Cov[X, Y] \end{aligned}$$

3.10 Kovarianz

Die Kovarianz ist ein Mass für den Zusammenhang zwischen zwei Zufallsvariablen X und Y bzw. der Streuung zwischen ihnen.

$$\begin{aligned} Cov[X, Y] &= E[(X - E[X])(Y - E[Y])] \\ Cov[X, Y] &= E[XY] - E[X] \cdot E[Y] \\ Cov[X, Y] &= \frac{1}{2} \cdot (Var[X + Y] - Var[X] - Var[Y]) \\ Cov[X, Y] &= Cov[Y, X] \\ Cov[X, X] &= Var[X] \\ Cov[aX + b, Y] &= a \cdot Cov[X, Y] \\ Cov[X + Y, Z] &= Cov[X, Z] + Cov[Y, Z] \\ \forall a \in \mathbb{R} : Cov[X, a] &= 0 \\ \forall b \in \mathbb{R} : Cov[X, bY] &= b \cdot Cov[X, Y] \end{aligned}$$

3.11 Standardabweichung

$$sd[X] = \sqrt{Var[X]}$$

4 Diskrete Verteilungen

4.1 Bernoulli-Verteilung

Verteilung eines Experiments mit zwei Ausgängen (Erfolg, Misserfolg) mit Erfolgsparameter p .

Notation:

$$X \sim Be(p)$$

Gewichtsfunktion:

$$f(x) = P[X = x] = p^x \cdot (1 - p)^{1-x}$$

Erwartungswert:

$$E[X] = p$$

Varianz:

$$Var[X] = p(1 - p)$$

Standardabweichung:

$$sd[X] = \sqrt{Var[X]} = \sqrt{np(1 - p)}$$

4.2 Binomial-Verteilung

Beschreibt die Anzahl der Erfolge in einer Serie von *gleichartigen* und *unabhängigen* Versuchen, die jeweils genau zwei mögliche Ergebnisse haben ("Erfolg" oder "Misserfolg"). n ist die Anzahl der Versuche bzw. Wiederholungen, p ist die Wahrscheinlichkeit für einen Erfolg.

Notation:

$$X \sim \text{Bin}(n, p)$$

Gewichtsfunktion:

$$f(x) = P[X = x] = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}$$

Verteilungsfunktion:

$$F(x) = P[X \leq x] = \sum_{k=0}^x \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}$$

Erwartungswert:

$$E[X] = np$$

Varianz:

$$\text{Var}[X] = np(1-p)$$

Standardabweichung:

$$sd[X] = \sqrt{\text{Var}[X]} = \sqrt{np(1-p)}$$

Bemerkungen:

- Die Binomialverteilung $\text{Bin}(n, p)$ darf für grosse n und kleine p näherungsweise durch die Poisson-Verteilung mit Parameter $\lambda = np$ ersetzt werden (Faustregel: $np < 10$ und $n > 1500p$).

4.3 Geometrische Verteilung

Wartezeit auf ersten Erfolg bei einer Folge von 0-1-Experimenten mit Erfolgsparameter p . X ist die Nummer des ersten erfolgreichen Experiments.

Notation:

$$X \sim \text{Geom}(p)$$

Gewichtsfunktion:

$$f(x) = P[X = x] = p(1-p)^{x-1}$$

Verteilungsfunktion:

$$F(x) = P[X \leq x] = 1 - (1-p)^x$$

Erwartungswert:

$$E[X] = \frac{1}{p}$$

Varianz:

$$\text{Var}[X] = \frac{1-p}{p^2}$$

Standardabweichung:

$$sd[X] = \sqrt{\text{Var}[X]} = \sqrt{\frac{1-p}{p^2}}$$

4.4 Poisson-Verteilung

Ereignet sich in einem Intervall (z.B. in einer gewissen Zeit, auf einer gewissen Fläche, in einem gewissen Volumen, usw.) ein völlig zufällig auftretendes Ereignis im Schnitt μ mal (Erwartungswert), dann ist die Zufallsgrösse, welche die Häufigkeit des Ereignisses in diesem Intervall angibt, poissonverteilt mit Parameter $\lambda = \mu$.

Notation:

$$X \sim P(\lambda), X \sim \text{Pois}(\lambda)$$

Gewichtsfunktion:

$$f(x) = P[X = x] = e^{-\lambda} \frac{\lambda^x}{x!}$$

Verteilungsfunktion:

$$F(x) = P[X \leq x] = e^{-\lambda} \sum_{k=0}^x \frac{\lambda^k}{k!}$$

Erwartungswert:

$$E[X] = \lambda$$

Varianz:

$$\text{Var}[X] = \lambda$$

Standardabweichung:

$$sd[X] = \sqrt{\text{Var}[X]} = \sqrt{\lambda}$$

Bemerkungen

- Falls $Z = X + Y$ und $X \sim \text{Pois}(\lambda)$, $Y \sim \text{Pois}(\mu)$ dann gilt $Z \sim \text{Pois}(\lambda + \mu)$.

4.5 Negativbinomiale Verteilung

Wartezeit auf den r -ten Erfolg bei einer Folge von unabhängigen 0-1-Experimenten mit Erfolgsparameter p .

Notation:

$$X \sim \text{NB}(r, p)$$

Gewichtsfunktion:

$$f(x) = P[X = x] = \binom{x-1}{r-1} p^r (1-p)^{x-r}$$

Verteilungsfunktion:

$$F(x) = P[X \leq x] = \sum_{i=r}^x \binom{i-1}{r-1} p^r (1-p)^{i-r}$$

Erwartungswert:

$$E[X] = \frac{r}{p}$$

Varianz:

$$\text{Var}[X] = \frac{r(1-p)}{p^2}$$

Standardabweichung:

$$sd[X] = \sqrt{\text{Var}[X]} = \sqrt{\frac{r(1-p)}{p^2}}$$

4.6 Hypergeometrische Verteilung

Notation:

$$X \sim \text{HypGeom}(n, m, r)$$

Gewichtsfunktion:

$$f(x) = P[X = x] = \frac{\binom{r}{x} \binom{n-r}{m-x}}{\binom{n}{m}}$$

Verteilungsfunktion:

$$F(x) = P[X \leq x] = \sum_{k=\max(0, m-n)}^x \frac{\binom{r}{k} \binom{n}{m-k}}{\binom{r+n}{m}}$$

Erwartungswert:

$$E[X] = \frac{mr}{n}$$

Varianz:

$$\text{Var}[X] = \frac{mr}{n^2(n-1)}(n-r)(n-m)$$

Standardabweichung:

$$sd[X] = \sqrt{\text{Var}[X]} = \sqrt{\frac{mr}{n^2(n-1)}(n-r)(n-m)}$$

5 Stetige Verteilungen

5.1 Gleichverteilung

Alle Ereignisse zwischen a und b sind gleich wahrscheinlich.

Notation:

$$X \sim U(a, b)$$

Dichtefunktion:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{für } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Verteilungsfunktion:

$$F(x) = P[X \leq x] = \begin{cases} 0 & \text{für } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{für } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{für } x > b \end{cases}$$

Erwartungswert:

$$E[X] = \frac{b+a}{2}$$

Varianz:

$$\text{Var}[X] = \frac{(b-a)^2}{12}$$

Standardabweichung:

$$sd[X] = \sqrt{\text{Var}[X]} = \sqrt{\frac{(b-a)^2}{12}}$$

5.2 Exponentialverteilung

Die Exponentialverteilung ist ein Modell für Wartezeiten und Lebensdauern. Beispielanwendungen sind die Berechnung der Lebensdauer von Bauteilen und Zugverspätungen.

Notation:

$$X \sim \text{Exp}(\lambda)$$

Dichtefunktion:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & \text{für } x \geq 0 \\ 0 & \text{für } x < 0 \end{cases}$$

Verteilungsfunktion:

$$F(x) = P[X \leq x] = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x} & \text{für } x \geq 0 \\ 0 & \text{für } x < 0 \end{cases}$$

Erwartungswert:

$$E[X] = \frac{1}{\lambda}$$

Varianz:

$$\text{Var}[X] = \frac{1}{\lambda^2}$$

Standardabweichung:

$$sd[X] = \sqrt{\text{Var}[X]} = \sqrt{\frac{1}{\lambda^2}}$$

Bemerkungen:

- Sind $X_1 \sim \text{Exp}(\lambda_1), \dots, X_n \sim \text{Exp}(\lambda_n)$ stochastisch unabhängig, so ist $\min(X_1, \dots, X_n) \sim \text{Exp}(\lambda_1 + \dots + \lambda_n)$.
- Die Summe von n exponentialverteilten Zufallsvariablen mit gleichem Parameter λ ist gammaverteilt mit $\Gamma(n, \lambda)$.
- Erwartungswert und Standardabweichung sind gleich ($E[X] = sd[X]$).

5.3 Normalverteilung

Die besondere Bedeutung der Normalverteilung beruht unter anderem auf dem zentralen Grenzwertsatz, der besagt, dass eine Summe von n unabhängigen, identisch verteilten Zufallsvariablen mit endlicher Varianz im Grenzwert $n \rightarrow \infty$ normalverteilt ist.

Notation:

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

Dichtefunktion:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Verteilungsfunktion:

$$F(x) = P[X \leq x] = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt$$

Erwartungswert:

$$E[X] = \mu$$

Varianz:

$$Var[X] = \sigma^2$$

Standardabweichung:

$$sd[X] = \sqrt{Var[X]} = \sqrt{\sigma^2}$$

Transformation einer normalverteilten Zufallsvariable X in eine standardnormalverteilte Zufallsvariable Z :

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

5.4 Standardnormalverteilung

Notation:

$$X \sim N(0, 1)$$

Dichtefunktion:

$$\phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{u^2}{2}}$$

Verteilungsfunktion:

$$\Phi(u) = P[X \leq u] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^u e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

Erwartungswert:

$$E[X] = 0$$

Varianz:

$$Var[X] = 1$$

Standardabweichung:

$$sd[X] = \sqrt{Var[X]} = \sqrt{1}$$

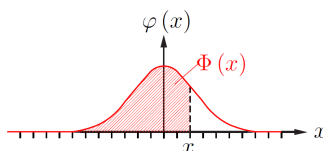
Bemerkungen:

- Die Standardnormalverteilung entspricht einer Normalverteilung mit den Parametern $\mu = 0$ und $\sigma = 1$.

5.4.1 Tabelle ablesen

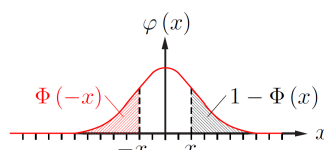
$\Phi(x)$ bedeutet, dass man zu einem Wert x die Wahrscheinlichkeit in der Tabelle auslesen will. $\Phi^{-1}(x)$ bedeutet, dass für eine Wahrscheinlichkeit der Tabellenwert ermittelt werden soll.

Positive Werte: $\Phi(x)$



Bsp: $\Phi(1.25) = 0.8944$

Negative Werte: $\Phi(-x) = 1 - \Phi(x)$



Bsp: $\Phi(-1.25) = 1 - \Phi(1.25) = 1 - 0.8944$

Für nicht tabellierte Werte:

$$\Phi^{-1}(0.03) = -\Phi^{-1}(0.97) = -1.88$$

Regeln zum Auslesen der Werte:

- Ist ein gesuchter Wert c nicht tabelliert, so wird derjenige Wert a oder b genommen, der näher bei c liegt.
- Sind zwei Werte a und b gleich weit vom gesuchten Wert c entfernt, so wird der Mittelwert von a und b verwendet.

6 Grenzwertsätze

In vielen Situationen taucht die Summe von *vielen gleichartigen Zufallsvariablen* auf. Wir möchten wissen, wie sich diese Summe etwa verhält, und untersuchen deshalb ihre Asymptotik, wenn die Anzahl der Summanden gegen unendlich geht.

Für die folgenden Sätze definieren wir einige Größen:

$$S_n = \sum_{i=1}^n X_i \text{ und } \bar{X}_n = \frac{S_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

6.1 Schwaches Gesetz der grossen Zahlen

Seien X_1, X_2, \dots, X_n *unabhängige* oder *paarweise unkorrelierte* Zufallsvariablen mit gleichem Erwartungswert $E[X_i] = \mu$ und gleicher Varianz $Var[X_i] = \sigma^2$. Sei $\bar{X}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$. Dann gilt:

$$\forall \epsilon > 0 : \lim_{n \rightarrow \infty} P[|\bar{X}_n - \mu| > \epsilon] = 0$$

Bemerkungen:

- Für hinreichend grosse n konvergiert der Mittelwert \bar{X}_n gegen den Erwartungswert μ .
- Der Satz funktioniert nicht, falls der Erwartungswert oder die Varianz nicht definiert sind.

6.2 Starkes Gesetz der grossen Zahlen

Seien X_1, \dots, X_n *unabhängige* Zufallsvariablen mit *gleicher Verteilung* (i.i.d) und Erwartungswert $E[X_i] = \mu$. Sei $\bar{X}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$. Dann gilt:

$$P\left[\lim_{n \rightarrow \infty} \bar{X}_n = \mu\right] = 1$$

Bemerkungen:

- Für hinreichend grosse n konvergiert der Mittelwert \bar{X}_n gegen den Erwartungswert μ .

6.3 Zentraler Grenzwertsatz

$X_1, X_2, X_3, \dots, X_n, \dots$ seien *stochastisch unabhängige* Zufallsvariablen, die alle der *gleichen* Verteilungsfunktion mit Erwartungswert μ und Varianz σ^2 genügen. Dann konvergiert die Verteilungsfunktion $F_Z(u)$ der standardisierten Zufallsvariablen

$$Z_n = \frac{(X_1 + X_2 + \dots + X_n) - n\mu}{\sqrt{n}\sigma}$$

im Grenzfalle $n \rightarrow \infty$ gegen die Verteilungsfunktion $\Phi(t)$ der Standardnormalverteilung:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} F_Z(u) = \Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^u e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

Bemerkungen:

- Für ein hinreichend grosses n ist $Z_n = X_1 + X_2 + \dots + X_n$ annähernd *normalverteilt* mit Erwartungswert $E[Z_n] = n\mu$ und Varianz $Var[Z_n] = n\sigma^2$.

7 Statistik

7.1 Schätzer

Schätzer sind Funktionen von Zufallsvariablen und somit selbst wieder Zufallsvariablen. Sie verfügen deshalb über einen Erwartungswert und eine Varianz.

7.1.1 Erwartungstreuer Schätzer

Ein Schätzer T ist *erwartungstreu* wenn der Erwartungswert des Schätzers gleich dem zu schätzenden Parameter ϑ ist:

$$E[T] = \vartheta$$

7.1.2 Konsistenter Schätzer

Ein Schätzer T ist *konsistent* wenn er mit zunehmendem Stichprobenumfang n gegen den gesuchten Parameter ϑ konvergiert:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P_{\vartheta} \left[|T^{(n)} - \vartheta| > \epsilon \right] = 0 \text{ (für jedes } \epsilon > 0 \text{)}$$

7.1.3 Momenten-Methode

Sei X_1, X_2, \dots, X_n eine Stichprobe vom Umfang n mit gegebener Verteilung t . Die Parameter von t seien unbekannt. Mit der Momenten-Methode können diese geschätzt werden. Der Momentenschätzer ist i.d.R. nicht erwartungstreu.

Vorgehen:

1. Moment berechnen: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
2. 2. Moment berechnen: $s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$
3. Nimm die Formel für den Erwartungswert der geg. Verteilung t und setze sie gleich \bar{x}
4. Nimm die Formel für die Varianz der geg. Verteilung t und setze sie gleich s^2
5. Löse das Gleichungssystem auf. Du erhältst die gesuchten Parameter.

7.1.4 Maximum-Likelihood-Methode

Methode zur systematischen Gewinnung von Schätzfunktionen.

Vorgehen:

1. Likelihood-Funktion $L(x_1, \dots, x_n, \vartheta) = \prod_{i=1}^n f(x_i, \vartheta)$ aufstellen
2. Log-Likelihood-Funktion $\log L(x_1, \dots, x_n, \vartheta)$ aufstellen (logarithmieren von L)
3. $\log L$ mit Hilfe elementarer Logarithmenregeln möglichst vereinfachen
4. $\log L$ nach jedem unbekannten Parameter partiell ableiten
5. Partielle Ableitungen = 0 setzen
6. Gleichungssystem nach Parametern auflösen

7.2 Tests

7.2.1 Wichtige Begriffe

- **Nullhypothese H_0 :** Die zu prüfende Annahme.
- **Alternativhypothese H_A :** Alternative Annahme, falls H_0 verworfen werden muss.
- **Signifikanzniveau α :** Ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Nullhypothese verworfen werden muss (auch Wahrscheinlichkeit für Fehler 1. Art).
- **Teststatistik T :** Test- oder Prüfwert.
- **P-Wert:** Das kleinste Niveau, auf dem der Test die Nullhypothese noch verwirft.
- **Fehler 1. Art:** H_0 wird verworfen, obwohl sie richtig wäre.
- **Fehler 2. Art:** H_0 wird beibehalten, obwohl H_A stimmt.

7.2.2 Allgemeines Vorgehen

1. Wahl des Modells
2. Formulieren von H_0 und H_A .
3. Signifikanzniveau α festlegen.
4. Teststatistik T festlegen.
5. Bestimmen der kritischen Grenzen.
6. Konkreter Wert für Teststatistik T berechnen.
7. Testentscheidung: H_0 beibehalten oder verwerfen?

7.2.3 z-Test

Der z-Test ist ein Test für den Erwartungswert bei *bekannter* Varianz σ^2 . Es seien also $X_1, X_2, \dots, X_n \sim N(\vartheta, \sigma^2)$ i.i.d.. Wir wollen die Nullhypothese $\vartheta = \vartheta_0$ testen.

$$\begin{aligned} \text{Mittelwert } \bar{X}: \quad \bar{X} &= \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \\ \text{Teststatistik } T: \quad T &= \frac{\bar{X} - \vartheta_0}{\sigma/\sqrt{n}} \sim N(0, 1) \end{aligned}$$

Kritischer Bereich:

Den kritischen Bereich bestimmt man abhängig von der Alternativhypothese H_A :

- $\vartheta_A > \vartheta_0$ einseitig: $K = (c_>, \infty)$ mit

$$c_> = (1 - \alpha)\text{-Quantil} = \Phi^{-1}(1 - \alpha)$$

- $\vartheta_A < \vartheta_0$ einseitig: $K = (-\infty, c_<)$ mit

$$c_< = \alpha\text{-Quantil} = \Phi^{-1}(\alpha)$$

- $\vartheta_A \neq \vartheta_0$ zweiseitig: $K = (-\infty, c_{\neq}) \cup (c_{\neq}, \infty)$ mit

$$c_{\neq} = \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)\text{-Quantil} = \Phi^{-1}\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)$$

7.2.4 t-Test

Der t-Test ist ein Test für den Erwartungswert bei *unbekannter* Varianz σ^2 . Es seien also $X_1, X_2, \dots, X_n \sim N(\vartheta, \sigma^2)$ i.i.d.. Wir wollen die Nullhypothese $\vartheta = \vartheta_0$ testen.

$$\begin{aligned} \text{Mittelwert } \bar{X}: \quad \bar{X} &= \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \\ \text{Schätzfunktion für } S^2: \quad S^2 &= \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \\ \text{Teststatistik } T: \quad T &= \frac{\bar{X} - \vartheta_0}{S/\sqrt{n}} \sim t_{n-1} \end{aligned}$$

Die Teststatistik T ist **t-verteilt** mit $n-1$ **Freiheitsgraden**. Der kritische Bereich lässt sich analog zum z-Test mit den Quantilen der t_{n-1} -Verteilung bestimmen.

7.2.5 Ungepaarter Zweistichproben-z-Test

Seien $X_1, X_2, \dots, X_n \sim N(\mu_X, \sigma^2)$ und $Y_1, Y_2, \dots, Y_m \sim N(\mu_Y, \sigma^2)$ zwei Stichproben mit $m = n$ oder $m \neq n$. Die Erwartungswerte μ_X und μ_Y seien unbekannt, die Varianz σ^2 sei *bekannt*. Der Test kann wie ein normaler z-Test durchgeführt werden, als Teststatistik T wird jedoch folgende Formel verwendet:

$$T = \frac{(\bar{X}_n - \bar{Y}_m) - (\mu_X - \mu_Y)}{\sigma \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{m}}} \sim N(0, 1)$$

7.2.6 Ungepaarter Zweistichproben-t-Test

Seien $X_1, X_2, \dots, X_n \sim N(\mu_X, \sigma^2)$ und $Y_1, Y_2, \dots, Y_m \sim N(\mu_Y, \sigma^2)$ zwei Stichproben mit $m = n$ oder $m \neq n$. Die Erwartungswerte μ_X und μ_Y seien unbekannt, die Varianz

σ^2 sei ebenfalls *unbekannt*. Der Test kann wie ein normaler t-Test durchgeführt werden, als Teststatistik T wird jedoch folgende Formel verwendet:

$$S_X^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2$$

$$S_Y^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (Y_j - \bar{Y}_m)^2$$

$$S^2 = \frac{1}{m+n-2} ((n-1)S_X^2 + (m-1)S_Y^2)$$

$$T = \frac{(\bar{X}_n - \bar{Y}_m) - (\mu_X - \mu_Y)}{S \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{m}}} \sim t_{n+m-2}$$

7.3 Konfidenzbereiche

Ein Konfidenzbereich gibt ein Intervall an, in dem sich ein gesuchter Parameter mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit befindet.

8 Differentialrechnung

8.1 Faktorregel

Ein konstanter Faktor bleibt beim Differenzieren erhalten:

$$y = C \cdot f(x) \Rightarrow y' = C \cdot f'(x)$$

8.2 Summenregel

Bei einer endlichen Summe von Funktionen darf gliedweise differenziert werden:

$$y = f_1(x) + f_2(x) + \dots + f_n(x) \Rightarrow y' = f'_1(x) + f'_2(x) + \dots + f'_n(x)$$

8.3 Produktregel

Die Ableitung einer in Produktform $y = u(x) \cdot v(x)$ darstellbaren Funktion erhält man nach folgender Produktregel:

$$y' = u'(x) \cdot v(x) + u(x) \cdot v'(x) = u'v + uv'$$

8.4 Quotientenregel

Die Ableitung einer Funktion, die als Quotient zweier Funktionen $u(x)$ und $v(x)$ in der Form $y = \frac{u(x)}{v(x)}$ darstellbar ist, erhält man nach der Quotientenregel:

$$y' = \frac{u'(x) \cdot v(x) - u(x) \cdot v'(x)}{v^2(x)}$$

8.5 Kettenregel

Die Ableitung einer zusammengesetzten (verketteten) Funktion $y = F(u(x)) = f(x)$ erhält man als Produkt aus äusserer und innerer Ableitung:

$$y' = \frac{dy}{dx} = \frac{dy}{du} \cdot \frac{du}{dx}$$

8.6 Partielle Differentiation

Summanden, die keine Variable beinhalten nach der abgeleitet wird, fallen WEG!

8.7 Wichtige elementare Ableitungen

$$\begin{aligned}f(x) = c &\rightarrow f'(x) = 0 \\f(x) = x^n &\rightarrow f'(x) = n \cdot x^{n-1} \\f(x) = \sqrt{x} &\rightarrow f'(x) = \frac{1}{2\sqrt{x}} \\f(x) = e^x &\rightarrow f'(x) = e^x \\f(x) = a^x &\rightarrow f'(x) = (\ln a) \cdot a^x \\f(x) = \ln x &\rightarrow f'(x) = \frac{1}{x} \\f(x) = \log_a x &\rightarrow f'(x) = \frac{1}{(\ln a) \cdot x}\end{aligned}$$

9 Integralrechnung

9.1 Faktorregel

Ein konstanter Faktor darf vor das Integral gezogen werden:

$$\int_a^b C \cdot f(x) dx = C \cdot \int_a^b f(x) dx$$

9.2 Summenregel

Eine endliche Summe von Funktionen darf giedweise integriert werden:

$$\begin{aligned}\int_a^b (f_1(x) + f_2(x) + \dots + f_n(x)) dx = \\ \int_a^b f_1(x) dx + \int_a^b f_2(x) dx + \dots + \int_a^b f_n(x) dx\end{aligned}$$

9.3 Vertauschungsregel

Vertauschen der beiden Integrationsgrenzen bewirkt einen Vorzeichenwechsel des Integrals:

$$\int_a^b f(x) dx = - \int_b^a f(x) dx$$

9.4 Gleiche Integrationsgrenzen

Fallen die Integrationsgrenzen zusammen ($a = b$), so ist der Integralwert gleich Null:

$$\int_a^b f(x) dx = 0$$

9.5 Partielle Integration

$$\int f(x) dx = \int u(x) \cdot v'(x) dx = u(x) \cdot v(x) - \int u'(x) \cdot v(x) dx$$

Vorgehen:

1. Integrand in $u(x)$ und $v'(x)$ zerlegen.

2. $u(x)$ ableiten, $v'(x)$ integrieren.

3. Formel aufschreiben und lösen.

9.6 Wichtige Stammintegrale

$$\begin{aligned}\int x^n dx &= \frac{x^{n+1}}{n+1} + C & \int a^x dx &= \frac{a^x}{\ln a} + C \\ \int \frac{1}{x} dx &= \ln |x| + C & \int e^x dx &= e^x + C\end{aligned}$$

10 Verschiedenes

Binomialkoeffizient

Der Binomialkoeffizient

$$\binom{n}{k}$$

gibt für $n, k \in \mathbb{N}$ an, **wie viele Möglichkeiten es gibt, k Objekte aus n Objekten auszuwählen**. Damit gibt der Binomialkoeffizient an, wie viele k -elementige Teilmengen aus einer n -elementigen Menge gebildet werden können (gesprochen: "k aus n" oder "k tief n").

Für $k = 0$ ist der Binomialkoeffizient 1:

$$\binom{n}{0} = 1$$

Für $k = 1$ ist der Binomialkoeffizient n :

$$\binom{n}{1} = n$$

Für $k > n$ ist der Binomialkoeffizient stets 0.

Gammafunktion

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt = (x-1)!$$

Diverse Summenformeln

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} = e$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{\lambda^k}{k!} = e^\lambda$$

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\lambda^k}{k!} = e^\lambda - 1$$

$$\sum_{i=0}^n i = \sum_{i=1}^n i = \frac{n(n-1)}{2}$$

$$\sum_{i=1}^n i^2 = \frac{n \cdot (n+1) \cdot (2n+1)}{6}$$

$$\sum_{i=0}^{\infty} a \cdot p^i = \sum_{i=1}^{\infty} a \cdot p^{i-1} = \frac{a}{1-p}$$

Produkteformeln

$$\prod_{k=m}^n a \cdot x_i = a^{n-m+1} \cdot \prod_{k=m}^n x_i$$

Logarithmenregeln

$$\begin{aligned}\log(uv) &= \log(u) + \log(v) \\ \log\left(\frac{u}{v}\right) &= \log(u) - \log(v) \\ \log_b(r) &= \frac{\log_a(r)}{\log_a(b)} \\ \log_a(u^k) &= k \cdot \log_a(u) \\ \log_a(\sqrt[n]{u}) &= \log_a(u^{\frac{1}{n}}) = \frac{1}{n} \cdot \log_a(u) \\ \log_a(a^b) &= b \\ \log 1 &= 0 \\ \log_a(a) &= 1 \\ \ln e &= 1\end{aligned}$$

11 Beispiele

11.1 t-Test

Ein Waschmittelhersteller bringt 5kg-Packungen in den Umlauf. Die Konsumentenschutzorganisation kauft 25 Packungen. Es ergibt sich ein Mittel von $\bar{X} = 4.9kg$ und eine empirische Stichprobenvarianz $S^2 = 0.1kg^2$. Die einzelnen Gewichte seien durch unabhängige $N(\mu, \sigma^2)$ Zufallsvariablen beschrieben.

1. Wie lauten die Hypothesen H_0 und H_A ?
2. Wie ist $(\bar{X} - 5)/(S/5)$ verteilt unter H_0 ?
3. Führen Sie den t-Test auf dem 5
4. Berechnen Sie das 95%-Vertrauensintervall für den in 3. beschriebenen Test.

Lösung:

1. $H_0 : \mu = 5, H_1 : \mu < 5$
2. Verteilung: $\sim t_{5^2-1} = t_{24}$
3. $T_1 = \frac{\bar{X}-\mu_0}{S/\sqrt{n}} = -1.581$. Wir ermitteln das t-Quantil für $n-1 = 24$ Freiheitsgrade und $t^{-1}(\alpha) = t^{-1}(0.05) = t^{-1}(0.95) = 1.711$. Somit erhalten wir eine kritische Grenze von $c = -1.711$. Weil $T_1 = -1.581 > c$ ist, wird die Nullhypothese nicht verworfen.
4. ???

11.2 Erwartungstreuer Schätzer

Wir prüfen, ob der Schätzer $T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ erwartungstreu ist.

$$E[T] = E\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i\right] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E[X_i] = \frac{1}{n} \cdot n \cdot \mu = \mu$$

Der Schätzer T ist erwartungstreu.

11.3 Verteilung der Summe zweier normalverteilter ZV

Seien $X \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$ und $Y \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$. Wie ist $Z = 1 + aX + bY$ verteilt?

Lösung:

$$\begin{aligned}Z &\sim N(1 + aE[X] + bE[Y], a^2Var[X] + b^2Var[Y]) \\ &\sim N(1 + a\mu_1 + b\mu_2, a^2\sigma_1^2 + b^2\sigma_2^2)\end{aligned}$$