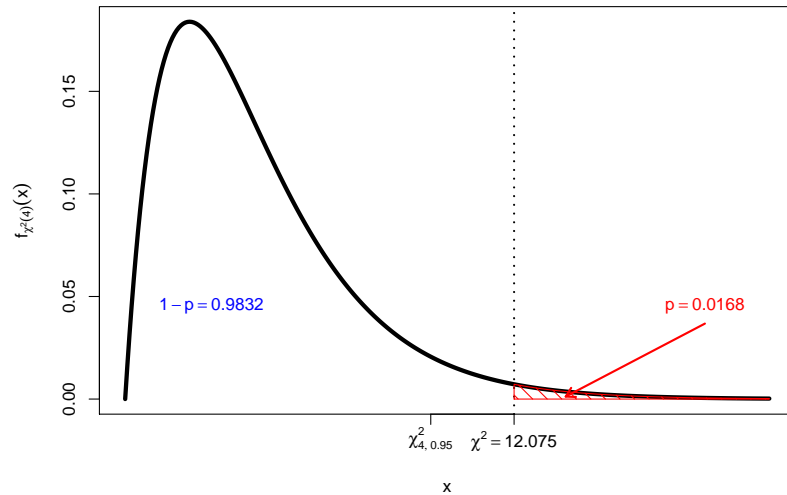


Beispiel: p -Wert bei Chi-Quadrat-Anpassungstest (Grafik)

Auftragseingangsbeispiel, realisierte Teststatistik $\chi^2 = 12.075$, p -Wert: 0.0168



Fortsetzung Beispiel

- Stichprobeninformation: Häufigkeitsverteilung aus Klassierung einer einfachen Stichprobe vom Umfang $n = 100$ zu Y liefert:

i	1	2	3	4	5	6
a_i	0	1	2	3	4	≥ 5
n_i	32	19	16	16	6	11

- Gewünschtes Signifikanzniveau: $\alpha = 0.10$

Chi-Quadrat-Anpassungstest:

1 **Hypothesen:**

$$H_0 : F_Y = F_{\text{Geom}(0.25)} \quad H_1 : F_Y \neq F_{\text{Geom}(0.25)}$$

2 **Teststatistik:**

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i^0)^2}{np_i^0} \text{ ist unter } H_0 \text{ approximativ } \chi^2(k-1)\text{-verteilt, falls } np_i^0 \geq 5 \text{ für alle } i \text{ gilt.}$$

Beispiel: Chi-Quadrat-Anpassungstest auf $H_0 : Y \sim \text{Geom}(0.25)$

- Geom(0.25)-Verteilung hat unendlichen Träger $\{0, 1, 2, \dots\}$ und Wahrscheinlichkeitsfunktion

$$p_{\text{Geom}(0.25)} : \mathbb{N}_0 \rightarrow [0, 1]; p_{\text{Geom}(0.25)}(i) = (1 - 0.25)^i \cdot 0.25,$$

Bedingung $np_i^0 \geq 5$ kann also mit $p_i^0 = p_{\text{Geom}(0.25)}(a_i)$ für $a_i := i - 1$ nicht für alle $i \in \mathbb{N}$ erfüllt sein.

- Klassierung hier also (trotz diskreter Verteilung) erforderlich. Wegen (für wachsendes i bzw. a_i) abnehmender p_i^0 sinnvoll: Zusammenfassung aller „großen“ i in der letzten Klasse K_k so, dass Bedingung $np_i^0 \geq 5$ für alle $i \in \{1, \dots, k\}$ erfüllt ist.
- Wahrscheinlichkeit (unter H_0) p_k^0 für Klasse K_k über Verteilungsfunktion oder als verbleibende Wahrscheinlichkeit $p_k^0 = 1 - \sum_{i=1}^{k-1} p_i^0$.
- Je nach Verteilung F_0 und Stichprobenumfang n können aber auch komplexere Klassierungen nötig sein, um Bedingung $np_i^0 \geq 5$ zu erfüllen.

3 **Kritischer Bereich zum Niveau $\alpha = 0.10$:**

$$K = (\chi_{k-1;1-\alpha}^2, +\infty) = (\chi_{5;0.90}^2, +\infty) = (9.236, +\infty)$$

4 **Berechnung der realisierten Teststatistik:**

K_i	n_i	p_i^0	np_i^0	$\frac{(n_i - np_i^0)^2}{np_i^0}$
$(-\infty, 0]$	32	$(1 - 0.25)^0 \cdot 0.25 = 0.25$	25.00	1.9600
$(0, 1]$	19	$(1 - 0.25)^1 \cdot 0.25 = 0.1875$	18.75	0.0033
$(1, 2]$	16	$(1 - 0.25)^2 \cdot 0.25 = 0.1406$	14.06	0.2677
$(2, 3]$	16	$(1 - 0.25)^3 \cdot 0.25 = 0.1055$	10.55	2.8154
$(3, 4]$	6	$(1 - 0.25)^4 \cdot 0.25 = 0.0791$	7.91	0.4612
$(4, +\infty)$	11	$1 - \sum_{i=1}^5 p_i^0 = 0.2373$	23.73	6.8290
Σ	100	1	100	$\chi^2 = 12.3366$

Es gilt $np_i^0 \geq 5$ für alle $i \in \{1, \dots, 6\} \rightsquigarrow$ Näherung ok.

5 **Entscheidung:**

$$\chi^2 = 12.3366 \in (9.236, +\infty) = K \Rightarrow H_0 \text{ wird abgelehnt!}$$

$$(p\text{-Wert: } 1 - F_{\chi^2(5)}(\chi^2) = 1 - F_{\chi^2(5)}(12.3366) = 1 - 0.9695 = 0.0305)$$

Test kommt zum Ergebnis, dass Y **nicht** einer Geom(0.25)-Verteilung genügt.

Beispiel: Chi-Quadrat-Anpassungstest (F_0 stetig)

- Klassierung bei stetigen hypothetischen Verteilungen unbedingt erforderlich.
- Hier: Klassierung soll vorgegeben sein (evtl. implizit durch bereits klassierte Stichprobeninformation statt vollständiger Urliste!)
- Bei eigener Wahl der Klassierung: Vorsicht, da Klassierung Test beeinflusst!
- Beispiel: Untersuchung, ob $Y \sim N(0, 1)$.
- Stichprobeninformation (aus einfacher Stichprobe vom Umfang $n = 200$):

i	1	2	3	4	5	6
K_i	$(-\infty, -1.5]$	$(-1.5, -0.75]$	$(-0.75, 0]$	$(0, 0.75]$	$(0.75, 1.5]$	$(1.5, \infty)$
n_i	9	26	71	51	30	13

- Gewünschtes Signifikanzniveau: $\alpha = 0.05$

Geeigneter Test: Chi-Quadrat-Anpassungstest

1 Hypothesen:

$$H_0 : F_Y = F_{N(0,1)} \quad H_1 : F_Y \neq F_{N(0,1)}$$

2 Teststatistik:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i^0)^2}{np_i^0} \text{ ist unter } H_0 \text{ approximativ } \chi^2(k-1)\text{-verteilt, falls}$$

$$np_i^0 \geq 5 \text{ für alle } i \text{ gilt.}$$

Chi-Quadrat-Anpassungstest auf parametrisches Verteilungsmodell

- Chi-Quadrat-Anpassungstest kann auch durchgeführt werden, wenn statt (einzeln) hypothetischer Verteilung eine parametrische Klasse von Verteilungen als hypothetische Verteilungsklasse fungiert.
- Durchführung des Chi-Quadrat-Anpassungstests dann in zwei Schritten:
 - 1 Schätzung der Verteilungsparameter innerhalb der hypothetischen Verteilungsklasse mit der ML-Methode.
 - 2 Durchführung des (regulären) Chi-Quadrat-Anpassungstest mit der hypothetischen Verteilung zu den geschätzten Parametern.
- Zu beachten:
 - ▶ **Verteilung der Testgröße χ^2 ändert sich!** Bei ML-Schätzung auf Basis der für die Durchführung des Chi-Quadrat-Anpassungstest maßgeblichen Klassierung der Stichprobe gilt unter H_0 näherungsweise $\chi^2 \sim \chi^2(k-r-1)$, wobei r die Anzahl der per ML-Methode geschätzten Parameter ist.
 - ▶ Werden die Verteilungsparameter nicht aus den klassierten Daten, sondern aus den ursprünglichen Daten mit ML-Methode geschätzt, gilt diese Verteilungsaussage so nicht mehr (Abweichung allerdings moderat).

3 Kritischer Bereich zum Niveau $\alpha = 0.05$:

$$K = (\chi_{k-1; 1-\alpha}^2, +\infty) = (\chi_{5; 0.95}^2, +\infty) = (11.070, +\infty)$$

4 Berechnung der realisierten Teststatistik:

$K_i = (a_{i-1}, a_i]$	n_i	$p_i^0 = F_0(a_i) - F_0(a_{i-1})$	np_i^0	$\frac{(n_i - np_i^0)^2}{np_i^0}$	
$(-\infty, -1.5]$	9	0.0668 - 0 = 0.0668	13.36	1.4229	
$(-1.5, -0.75]$	26	0.2266 - 0.0668 = 0.1598	31.96	1.1114	
$(-0.75, 0]$	71	0.5 - 0.2266 = 0.2734	54.68	4.8709	
$(0, 0.75]$	51	0.7734 - 0.5 = 0.2734	54.68	0.2477	
$(0.75, 1.5]$	30	0.9332 - 0.7734 = 0.1598	31.96	0.1202	
$(1.5, +\infty)$	13	1 - 0.9332 = 0.0668	13.36	0.0097	
Σ	200		1	200	7.7828

Es gilt $np_i^0 \geq 5$ für alle $i \in \{1, \dots, 6\} \rightsquigarrow$ Näherung ok.

5 Entscheidung:

$$\chi^2 = 7.7828 \notin (11.070, +\infty) = K \Rightarrow H_0 \text{ wird nicht abgelehnt!}$$

$$(p\text{-Wert: } 1 - F_{\chi^2(5)}(\chi^2) = 1 - F_{\chi^2(5)}(7.7828) = 1 - 0.8314 = 0.1686)$$

Test kann Hypothese, dass Y standardnormalverteilt ist, nicht verwerfen.

Zusammenfassung: Chi-Quadrat-Anpassungstest

zur Anpassung an parametrische Verteilungsfamilie

Anwendungs-voraussetzungen	approx.: Y beliebig verteilt, X_1, \dots, X_n einf. Stichprobe zu Y Familie von Verteilungsfunktionen F_θ für $\theta \in \Theta$ vorgegeben $k-1$ Klassengrenzen $a_1 < a_2 < \dots < a_{k-1}$ vorgegeben
Nullhypothese Gegenhypothese	$H_0 : F_Y = F_\theta$ für ein $\theta \in \Theta$ $H_1 : F_Y \neq F_\theta$ (für alle $\theta \in \Theta$)
Teststatistik Verteilung (H_0)	$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i^0)^2}{np_i^0} = n \sum_{i=1}^k \frac{(\frac{n_i}{n} - p_i^0)^2}{p_i^0} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \frac{n_i^2}{p_i^0} \right) - n$ χ^2 ist unter H_0 näherungsweise $\chi^2(k-r-1)$ -verteilt, wenn $\hat{\theta}$ ML-Schätzer des r -dim. Verteilungsparameters θ auf Basis klassierter Daten ist (Verwendung von $\hat{\theta}$ siehe unten). (Näherung nur vernünftig, falls $np_i^0 \geq 5$ für $i \in \{1, \dots, k\}$)
Benötigte Größen	$p_i^0 = F_{\hat{\theta}}(a_k) - F_{\hat{\theta}}(a_{k-1})$ mit $a_0 := -\infty, a_k := \infty,$ $n_i = \#\{j \in \{1, \dots, n\} \mid x_j \in (a_{i-1}, a_i]\}, i \in \{1, \dots, k\}$
Kritischer Bereich zum Niveau α	$(\chi_{k-r-1; 1-\alpha}^2, \infty)$
p -Wert	$1 - F_{\chi^2(k-r-1)}(\chi^2)$

Beispiel: Chi-Quadrat-Anpassungstest auf

$H_0 : Y \sim \text{Geom}(p)$ für $p \in (0, 1)$

- Stichprobeninformation: Häufigkeitsverteilung aus vorangegangenem Beispiel:

i	1	2	3	4	5	6
a_i	0	1	2	3	4	≥ 5
n_i	32	19	16	16	6	11

- Erster Schritt:**

ML-Schätzung von p mit Hilfe der klassierten Stichprobeninformation:

- Man kann zeigen, dass der ML-Schätzer auf Basis der klassierten Stichprobe durch

$$\hat{p} = \frac{n - n_k}{n - n_k + \sum_{i=1}^k (i-1) \cdot n_i}$$

gegeben ist.

- Hier erhält man also die Realisation

$$\hat{p} = \frac{100 - 11}{100 - 11 + 0 \cdot 32 + 1 \cdot 19 + 2 \cdot 16 + 3 \cdot 16 + 4 \cdot 6 + 5 \cdot 11} = \frac{89}{267} = 0.3333$$

- Berechnung der realisierten Teststatistik:**

Eine ML-Schätzung aus den klassierten Daten liefert den Schätzwert

$\hat{p} = 0.3333$ für den unbekanntem Verteilungsparameter p .

K_i	n_i	p_i^0	np_i^0	$\frac{(n_i - np_i^0)^2}{np_i^0}$
$(-\infty, 0]$	32	$(1 - 0.3333)^0 \cdot 0.3333 = 0.3333$	33.33	0.0531
$(0, 1]$	19	$(1 - 0.3333)^1 \cdot 0.3333 = 0.2223$	22.23	0.4693
$(1, 2]$	16	$(1 - 0.3333)^2 \cdot 0.3333 = 0.1481$	14.81	0.0956
$(2, 3]$	16	$(1 - 0.3333)^3 \cdot 0.3333 = 0.0988$	9.88	3.7909
$(3, 4]$	6	$(1 - 0.3333)^4 \cdot 0.3333 = 0.0658$	6.58	0.0511
$(4, +\infty)$	11	$1 - \sum_{i=1}^5 p_i^0 = 0.1317$	13.17	0.3575
Σ	100	1	100	$\chi^2 = 4.8175$

Es gilt $np_i^0 \geq 5$ für alle $i \in \{1, \dots, 6\} \rightsquigarrow$ Näherung ok.

- Entscheidung:**

$\chi^2 = 4.8175 \notin (7.779, +\infty) = K \Rightarrow H_0$ wird nicht abgelehnt!

(p -Wert: $1 - F_{\chi^2(4)}(\chi^2) = 1 - F_{\chi^2(4)}(4.8175) = 1 - 0.6935 = 0.3065$)

Test kommt zum Ergebnis, dass $Y \sim \text{Geom}(p)$ nicht verworfen werden kann.

(ML-Schätzung von p : $\hat{p} = 0.3333$)

- Zweiter Schritt:**

Durchführung des Chi-Quadrat-Anpassungstest für $H_0 : F_Y = F_{0.3333}$ (mit $F_p := F_{\text{Geom}(p)}$) gegen $H_1 : F_Y \neq F_{0.3333}$ **unter Berücksichtigung der ML-Schätzung von p durch geänderte Verteilung von χ^2 unter H_0 !**

Insgesamt: Chi-Quadrat-Anpassungstest für Verteilungsfamilie:

- Hypothesen:**

$H_0 : F_Y = F_p$ für ein $p \in (0, 1)$ (mit $F_p := F_{\text{Geom}(p)}$) gegen $H_1 : F_Y \neq F_p$

- Teststatistik:**

$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i^0)^2}{np_i^0}$ ist unter H_0 approximativ $\chi^2(k-1-r)$ -verteilt, falls

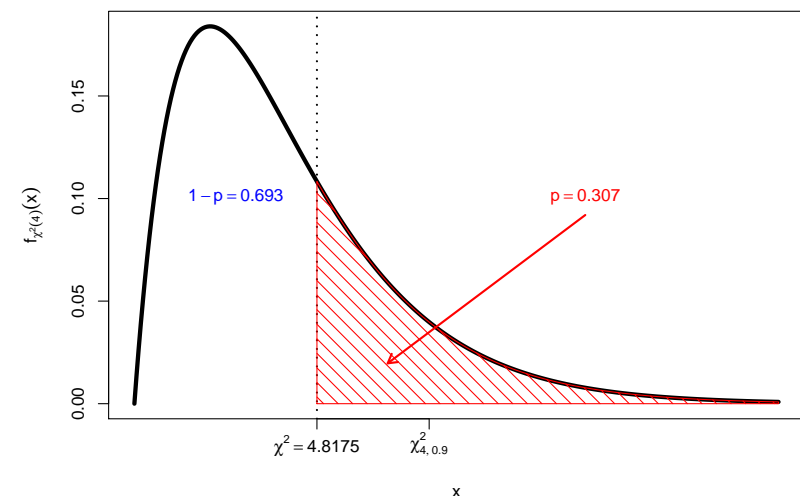
$np_i^0 \geq 5$ für alle i gilt und r -dimensionaler Verteilungsparameter per ML-Methode aus den klassierten Daten geschätzt wurde.

- Kritischer Bereich zum Niveau $\alpha = 0.10$:**

$K = (\chi_{k-1-r; 1-\alpha}^2, +\infty) = (\chi_{4; 0.90}^2, +\infty) = (7.779, +\infty)$

Beispiel: p -Wert bei Chi-Quadrat-Anpassungstest (Grafik)

Test auf geometrische Verteilung, realisierte Teststatistik $\chi^2 = 4.8175$, p -Wert: 0.307



Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest (Kontingenztest)

- *Bisher:* Einfache Stichprobe X_1, \dots, X_n zu **einer** Zufallsvariablen Y .
- *Im Folgenden:* Betrachtung von einfachen Stichproben zu mehrdimensionalen Zufallsvariablen bzw. (später) mehreren (unabhängigen) einfachen Stichproben zu mehreren Zufallsvariablen.
- Erste Problemstellung: **Untersuchung** von zwei Zufallsvariablen Y^A, Y^B auf **stochastische Unabhängigkeit**.
- Erforderliche Stichprobeninformation: Einfache Stichprobe

$$(X_1^A, X_1^B), (X_2^A, X_2^B), \dots, (X_n^A, X_n^B)$$

vom Umfang n zu zweidimensionaler Zufallsvariable (Y^A, Y^B) .

- *Testidee:* den bei Unabhängigkeit von Y^A, Y^B bestehenden Zusammenhang zwischen Randverteilungen von Y^A und Y^B sowie gemeinsamer Verteilung von (Y^A, Y^B) ausnutzen:
 - ▶ Gemeinsame Wahrscheinlichkeiten stimmen bei Unabhängigkeit mit Produkt der Randwahrscheinlichkeiten überein (falls (Y^A, Y^B) diskret).
 - ▶ Daher sprechen geringe Abweichungen zwischen gemeinsamen (relativen) Häufigkeiten und Produkt der (relativen) Randhäufigkeiten für Unabhängigkeit, große Abweichungen dagegen.

- Für wachsenden Stichprobenumfang n konvergiert die Verteilung der Testgröße χ^2 bei Gültigkeit von

$$H_0 : Y^A, Y^B \text{ sind stochastisch unabhängig}$$

gegen die $\chi^2((k-1) \cdot (l-1))$ -Verteilung.

- Die Näherung der Verteilung von χ^2 unter H_0 ist für endlichen Stichprobenumfang n vernünftig, falls gilt:

$$\tilde{n}_{ij} \geq 5 \text{ für alle } i \in \{1, \dots, k\}, j \in \{1, \dots, l\}$$

- Wie beim Chi-Quadrat-Anpassungstest sprechen **große** Werte der Teststatistik χ^2 **gegen** die Nullhypothese „ Y^A und Y^B sind stochastisch unabhängig“, während kleine Werte für H_0 sprechen.
- Als kritischer Bereich zum Signifikanzniveau α ergibt sich also entsprechend:

$$K = (\chi^2_{(k-1) \cdot (l-1); 1-\alpha}, \infty)$$

- Die Testgröße χ^2 ist eng verwandt mit der bei der Berechnung des korrigierten Pearsonschen Kontingenzkoeffizienten benötigten Größe χ^2 .
- Analog zum Chi-Quadrat-Anpassungstest kann der Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest ebenfalls auf „Merkmale“ Y^A bzw. Y^B angewendet werden, deren Ausprägungen a_1, \dots, a_k bzw. b_1, \dots, b_l noch nicht „Zufallsvariablen-konform“ als reelle Zahlen „kodiert“ wurden.

- Betrachtete Anwendungssituationen:
 - 1 Sowohl Y^A als auch Y^B sind diskret mit „wenigen“ Ausprägungen, in der Stichprobe treten die Ausprägungen a_1, \dots, a_k von Y^A bzw. b_1, \dots, b_l von Y^B auf.
 - 2 Y^A und Y^B sind diskret mit „vielen“ Ausprägungen oder stetig, die Stichprobeninformation wird dann mit Hilfe von Klassierungen $A_1 = (-\infty, a_1], A_2 = (a_1, a_2], \dots, A_k = (a_{k-1}, \infty)$ von Y^A bzw. $B_1 = (-\infty, b_1], B_2 = (b_1, b_2], \dots, B_l = (b_{l-1}, \infty)$ von Y^B zusammengefasst.
 - 3 Mischformen von 1 und 2.
- Der Vergleich zwischen (in der Stichprobe) **beobachteten** gemeinsamen absoluten Häufigkeiten n_{ij} und **bei Unabhängigkeit** (auf Basis der Randhäufigkeiten) **zu erwartenden** gemeinsamen absoluten Häufigkeiten \tilde{n}_{ij} erfolgt durch die Größe

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l \frac{(n_{ij} - \tilde{n}_{ij})^2}{\tilde{n}_{ij}}$$

wobei n_{ij} die beobachteten gemeinsamen Häufigkeiten für (a_i, b_j) bzw. (A_i, B_j) aus der Stichprobenrealisation und $\tilde{n}_{ij} = n \cdot \frac{n_{i \cdot}}{n} \cdot \frac{n_{\cdot j}}{n} = \frac{n_{i \cdot} \cdot n_{\cdot j}}{n}$ die erwarteten gemeinsamen Häufigkeiten aus den Randhäufigkeiten $n_{i \cdot}$ von a_i bzw. A_i und $n_{\cdot j}$ von b_j bzw. B_j sind ($i \in \{1, \dots, k\}, j \in \{1, \dots, l\}$).

- Darstellung der Stichprobeninformation üblicherweise in Kontingenztafel der Form

$Y^A \setminus Y^B$	b_1	b_2	\dots	b_l		$Y^A \setminus Y^B$	B_1	B_2	\dots	B_l
a_1	n_{11}	n_{12}	\dots	n_{1l}	bzw.	A_1	n_{11}	n_{12}	\dots	n_{1l}
a_2	n_{21}	n_{22}	\dots	n_{2l}		A_2	n_{21}	n_{22}	\dots	n_{2l}
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots		\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots
a_k	n_{k1}	n_{k2}	\dots	n_{kl}		A_k	n_{k1}	n_{k2}	\dots	n_{kl}

- Benötigte Größen $\tilde{n}_{ij} = \frac{n_{i \cdot} \cdot n_{\cdot j}}{n}$ können dann — nach Ergänzung der Kontingenztafel um ihre Randhäufigkeiten $n_{i \cdot} = \sum_{j=1}^l n_{ij}$ und $n_{\cdot j} = \sum_{i=1}^k n_{ij}$ — in weiterer Tabelle mit analogem Aufbau

$Y^A \setminus Y^B$	B_1	B_2	\dots	B_l	$n_{i \cdot}$
A_1	$\tilde{n}_{11} = \frac{n_{1 \cdot} \cdot n_{\cdot 1}}{n}$	$\tilde{n}_{12} = \frac{n_{1 \cdot} \cdot n_{\cdot 2}}{n}$	\dots	$\tilde{n}_{1l} = \frac{n_{1 \cdot} \cdot n_{\cdot l}}{n}$	$n_{1 \cdot}$
A_2	$\tilde{n}_{21} = \frac{n_{2 \cdot} \cdot n_{\cdot 1}}{n}$	$\tilde{n}_{22} = \frac{n_{2 \cdot} \cdot n_{\cdot 2}}{n}$	\dots	$\tilde{n}_{2l} = \frac{n_{2 \cdot} \cdot n_{\cdot l}}{n}$	$n_{2 \cdot}$
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots
A_k	$\tilde{n}_{k1} = \frac{n_{k \cdot} \cdot n_{\cdot 1}}{n}$	$\tilde{n}_{k2} = \frac{n_{k \cdot} \cdot n_{\cdot 2}}{n}$	\dots	$\tilde{n}_{kl} = \frac{n_{k \cdot} \cdot n_{\cdot l}}{n}$	$n_{k \cdot}$
$n_{\cdot j}$	$n_{\cdot 1}$	$n_{\cdot 2}$	\dots	$n_{\cdot l}$	n

(hier für 2. Variante) oder (falls genügend Raum vorhanden) direkt in der Kontingenztafel berechnet werden.

Zusammenfassung: Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest

Anwendungsvoraussetzungen	approximativ: (Y^A, Y^B) beliebig verteilt $(X_1^A, X_1^B), \dots, (X_n^A, X_n^B)$ einfache Stichprobe zu (Y^A, Y^B) Ausprägungen $\{a_1, \dots, a_k\}$ von Y^A , $\{b_1, \dots, b_l\}$ von Y^B oder Klassengrenzen $a_1 < \dots < a_{k-1}$ zu Y^A , $b_1 < \dots < b_{l-1}$ zu Y^B
Nullhypothese Gegenhypothese	$H_0: Y^A, Y^B$ stochastisch unabhängig $H_1: Y^A, Y^B$ nicht stochastisch unabhängig
Teststatistik	$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l \frac{(n_{ij} - \tilde{n}_{ij})^2}{\tilde{n}_{ij}} = \left(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l \frac{n_{ij}^2}{\tilde{n}_{ij}} \right) - n$
Verteilung (H_0)	χ^2 ist näherungsweise $\chi^2((k-1) \cdot (l-1))$ -verteilt, falls H_0 gilt (Näherung nur vernünftig, falls $\tilde{n}_{ij} \geq 5$ für alle i, j)
Benötigte Größen	$n_{ij} = \#\{m \in \{1, \dots, n\} \mid (x_m, y_m) \in A_i \times B_j\}$ für alle i, j mit $A_i = \{a_i\}$, $B_j = \{b_j\}$ bzw. Klassen A_i, B_j nach vorg. Grenzen, $\tilde{n}_{ij} = \frac{n_i \cdot n_j}{n}$ mit $n_i = \sum_{j=1}^l n_{ij}$, $n_j = \sum_{i=1}^k n_{ij}$,
Kritischer Bereich zum Niveau α	$(\chi_{(k-1) \cdot (l-1); 1-\alpha}^2, \infty)$
p-Wert	$1 - F_{\chi^2((k-1) \cdot (l-1))}(\chi^2)$

③ **Kritischer Bereich zum Niveau $\alpha = 0.05$:**

$$K = (\chi_{(k-1) \cdot (l-1); 1-\alpha}^2, +\infty) = (\chi_{2; 0.95}^2, +\infty) = (5.991, +\infty)$$

④ **Berechnung der realisierten Teststatistik:**

Um Randhäufigkeiten n_i und n_j ergänzte Tabelle der gemeinsamen Häufigkeiten:

$Y^A \setminus Y^B$	kurz	mittel	lang	n_i
Männlich	524	455	221	1200
Weiblich	413	263	124	800
n_j	937	718	345	2000

Tabelle der $\tilde{n}_{ij} = \frac{n_i \cdot n_j}{n}$:

$Y^A \setminus Y^B$	kurz	mittel	lang	n_i
Männlich	562.2	430.8	207.0	1200
Weiblich	374.8	287.2	138.0	800
n_j	937	718	345	2000

Es gilt $\tilde{n}_{ij} \geq 5$ für alle $1 \leq i \leq 2$ und $1 \leq j \leq 3 \rightsquigarrow$ Näherung ok.

Beispiel: Zusammenhang Geschlecht/tägl. Fahrzeit (PKW)

- Untersuchungsgegenstand: Sind die beiden Zufallsvariablen „Geschlecht“ (Y^A) und „täglich mit PKW zurückgelegte Strecke“ (Y^B) stochastisch unabhängig?
- Stichprobeninformation: (Kontingenz-)Tabelle mit gemeinsamen (in der Stichprobe vom Umfang $n = 2000$ beobachteten) Häufigkeiten, wobei für Y^B eine Klassierung in die Klassen „kurz“, „mittel“ und „lang“ durchgeführt wurde:

	Fahrzeit (Y^B)		
Geschlecht (Y^A)	kurz	mittel	lang
Männlich	524	455	221
Weiblich	413	263	124

- Gewünschtes Signifikanzniveau: $\alpha = 0.05$

Geeigneter Test: **Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest**

① **Hypothesen:**

$H_0: Y^A, Y^B$ stochastisch unabhängig gegen $H_1: Y^A, Y^B$ stoch. abhängig

② **Teststatistik:**

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l \frac{(n_{ij} - \tilde{n}_{ij})^2}{\tilde{n}_{ij}} \text{ ist unter } H_0 \text{ approximativ}$$

$\chi^2((k-1) \cdot (l-1))$ -verteilt, falls $\tilde{n}_{ij} \geq 5$ für alle $1 \leq i \leq k$ und $1 \leq j \leq l$.

④ (Fortsetzung: Berechnung der realisierten Teststatistik)

$$\begin{aligned} \chi^2 &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 \frac{(n_{ij} - \tilde{n}_{ij})^2}{\tilde{n}_{ij}} \\ &= \frac{(524 - 562.2)^2}{562.2} + \frac{(455 - 430.8)^2}{430.8} + \frac{(221 - 207)^2}{207} \\ &\quad + \frac{(413 - 374.8)^2}{374.8} + \frac{(263 - 287.2)^2}{287.2} + \frac{(124 - 138)^2}{138} \\ &= 2.5956 + 1.3594 + 0.9469 \\ &\quad + 3.8934 + 2.0391 + 1.4203 \\ &= 12.2547 \end{aligned}$$

⑤ **Entscheidung:**

$$\chi^2 = 12.2547 \in (5.991, +\infty) = K \Rightarrow H_0 \text{ wird abgelehnt!}$$

$$(p\text{-Wert: } 1 - F_{\chi^2(2)}(\chi^2) = 1 - F_{\chi^2(2)}(12.2547) = 1 - 0.9978 = 0.0022)$$

Der Test kommt also zum Ergebnis, dass die beiden Zufallsvariablen „Geschlecht“ und „tägliche Fahrzeit (PKW)“ stochastisch **abhängig** sind.