

5. Spezifikation quantitativer Modellgrößen

Modellbildung identifiziert

- Eigenschaften Ersatzsystem
(auf Basis mentalen Modells, in gewählter Abstraktion)

Eingeschlossen sind im Modell zu repräsentierende

- strukturelle und qualitative Eigenschaften
(Objekte, Prozesse, Regeln, Relationen, ...)
- quantitative Eigenschaften
(numerische Größen):
konkrete Werte / Wertverläufe zu spezifizieren

Klassifikation quantitativer Eigenschaften (EmSi70):

- **exogene** (numerische) Faktoren;
können (im Prinzip) verschiedene Werte haben,
beeinflussen Modellverhalten,
werden von Modellverhalten nicht beeinflusst
(falls für eine Untersuchung/Analyse fest:
"Konstante", "Parameter", "statische Größe"
sonst: "Variable" (im PS-Sinn), "dynamische Größe")
- **endogene** (numerische) Faktoren;
werden durch Modellverhalten (potentiell) beeinflusst

Erinnerung an Kap.1:

Unterscheidung

- kontrollierbare Größen:
"willkürlich" einstellbar (für "was-wenn"-Fragen,
zur Suche "optimale Güte")
- unkontrollierbare Größen:
als "unbeeinflussbar" angesehen ("was-wenn"-Fragen)

Um Simulation ablaufen lassen zu können,
müssen exogenen
(kontrollierbaren oder nicht kontrollierbaren)
Größen konkrete Werte / Werteverläufe zugewiesen sein

(Nachteil Simulation:
formale "Parameter" können nicht durchgetragen werden)

Woher Werte / Werteverläufe ??

3 prinzipielle Quellen:

- Theorie
- reale Welt
- Hypothesen (Annahmen)

Folgt Übersicht über

- exogene / endogene
 - kontrollierbare / nicht kontrollierbare
 - statische / dynamische
 - deterministische / stochastische
- numerische Modellgrößen

und daraus resultierender "Bedarf an Daten"

	kontrollierbar		nicht kontrollierbar	
	statisch	dynamisch	statisch	dynamisch
exogen	Annahmen treffen		aus Theorie entnehmen oder beobachten: messen, schätzen	
			deterministisch:	
	Wert	Fkt. der Zeit	Wert	Fkt. der Zeit
			stochastisch:	
	Verteilung	stoch. Proz.	Verteilung	stoch. Proz.
endogen	bei festliegender Aufgabenstellung nicht existent		ergeben sich aus Analyse	
			deterministisch:	
			Wert	Fkt. der Zeit
			stochastisch:	
			Wert-	Wertverlauf-
			menge (Stichprobe)	menge (Stichprob.- menge)



Bedarf an Daten:

exogen: für Simulation selbst

endogen: potentiell zur

"retrospektiven", "historischen"
Validierung

Abbildung 5.0.1: Klassifikation von "Faktoren"
und Bedarf an Daten

Für Modell insbesondere benötigt:

Bestimmung / Darstellung / Charakterisierung /

"Modellierung"

nicht kontrollierbarer, exogener Faktoren

Fälle:

- (i) statisch / deterministisch: Wert
 - aus Theorie
 - aus Messung realer Welt (System / Umgebung)

- (ii) statisch / stochastisch: Verteilung
 - aus Theorie
 - aus Messung realer Welt (System / Umgebung)
Realisierungen (Stichprobe) → Verteilung

- (iii) dynamisch / deterministisch: Zeitfunktion
 - aus Theorie
 - aus Messung realer Welt (System / Umgebung)

- (iv) dynamisch / stochastisch: stochastischer Prozeß
 - aus Theorie
 - aus Messung realer Welt (System / Umgebung)
Realisierungen (Zeitreihen) → Generierungsgesetze

- (i,iii) Vorgehen bekannt

- (ii) im folgenden genauer betrachtet

- (iv) schwieriger, meist auf (ii) zurückgeführt
auch: mit "traces" behandelt

5.1 Modellierung von Zufallsvariablen

Statisch-stochastische, numerische (exogene) Faktoren

- im Modell durch ZV beschrieben
- (zugehörige) Verteilung benötigt, um (während Simulation) Realisierungen zu ziehen (vgl 3.3)

Notwendige Modellierungsschritte:

- (i) Identifikation Verteilungstyp
- (ii) (uU) Schätzung Verteilungsparameter

Mögliche (typische) Situationen:

- (a) Verteilungstyp aus Theorie, Parameterschätzung aus real vorliegender Stichprobe
- (b) Empirische Verteilung aus Stichprobe, direkt zur Generierung Realisierungen verwendet
- (c) Verteilungstyp aus Stichprobe identifiziert, Parameterschätzung aus Stichprobe
- (d) Weder theoretische Hinweise noch reale Stichprobe vorhanden, lediglich "Charakter: ZV" feststehend

Literaturhinweis: LaKe82/...

Folgend alles für kontinuierliche Faktoren (als Bsp.),
diskrete Faktoren: vgl Literatur

zu (d):

- sehr "ungemütliche" Situation !
- uU Feld für (strittige!) "maximum entropy"-Verfahren
- im Anschluß: einige heuristische Tips
zu Verteilung und Parametern
einer zu modellierenden ZV Y

Alternative Situationen:

- subjektive Grenzen u, o bekannt / ermittelbar,
derart, daß $P[Y < u] \approx P[Y > o] \approx 0$

→ Vorschlag: **Gleichverteilung**

$$FY(y) = \begin{cases} 0 & y \leq u \\ (y-u)/(o-u) & u < y \leq o \\ 1 & y > o \end{cases}$$

$$E[Y] = \frac{u+o}{2}$$

M[Y] y-Wert maximaler Dichte (Modalwert, mode)
nicht eindeutig

- subjektive Grenzen u, o und subjektiver Modalwert w
bekannt / ermittelbar

→ Vorschlag: **Dreiecksverteilung**

$$FY(y) = \begin{cases} 0 & y \leq u \\ \frac{(y-u)^2}{(o-u) \cdot (w-u)} & u < y \leq w \\ 1 - \frac{(o-y)^2}{(o-u) \cdot (o-w)} & w < y \leq o \\ 1 & y > o \end{cases}$$

$$E[Y] = \frac{u+w+o}{3} \quad M[Y] = w$$

- subjektiv
 Grenzen u, o
 Modalwert w
 Mittelwert m
 bekannt / ermittelbar

→ Vorschlag: **Beta-Verteilung** "beta(α_1, α_2)"

Für $u=0, o=1$

(Translation, Dehnung/Stauchung möglich):

$$f_Y(y) = \begin{cases} y^{\alpha_1-1} \cdot (1-y)^{\alpha_2-1} / B(\alpha_1, \alpha_2) & 0 < y \leq 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$E[Y] = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (= m)$$

$$M[Y] = \frac{\alpha_1 - 1}{\alpha_1 + \alpha_2 - 2} \quad (= w)$$

$\alpha_1, \alpha_2 > 1$, aus m und w zu bestimmen,
 B(...) "Beta-Funktion":

$$B(\alpha_1, \alpha_2) := \int_0^1 t^{\alpha_1-1} \cdot (1-t)^{\alpha_2-1} dt$$

zu (a):

Einige Hinweise zu Verteilungsformen

auf Basis theoretischer Überlegungen (vgl. Mihr72, LaKe82)

- ZV Y , welche Summe einer größeren Anzahl zufälliger Einflüsse darstellt, könnte (zentraler Grenzwertsatz) **normalverteilt** sein
 $N(\mu, \sigma^2)$ -verteilt

$$f_Y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$E[Y] = \mu$$

$$\text{VAR}[Y] = \sigma^2$$

Beispiele: "natürliche" Faktoren wie Größe Lebewesen,
 aber: auf $y < 0$ achten ("truncation")

- ZV Y , welche Minimum einer größeren Anzahl zufälliger Einflüsse darstellt, könnte (Grenzwertsatz) **Weibull-verteilt** sein

$$F_Y(y) = \begin{cases} 1 - \exp(-(y/\beta)^\alpha) & y > 0 \\ 0 & y \leq 0 \end{cases}$$

Beispiele: "time between failures"
 komplexen technischen Systems

- ZV Y , welche zeitliche Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Ereignissen darstellt, wo anzunehmen, daß Ereignisse
 - einzeln auftreten
 - in (kleinerem) Zeitintervall der Länge Δt (bei beliebiger Lage solchen Zeitintervalls) mit fester Wahrscheinlichkeit $\approx \lambda \cdot \Delta t$ auftreten (wo λ positive "charakterisierende" Konstante)
 - insgesamt mit konstanter "Rate" λ auftreten könnte (Satz über "seltene Ereignisse")
 (negativ) **exponentiell verteilt** sein

$$F_Y(y) = \begin{cases} 1 - \exp(-\lambda \cdot y) & y > 0 \\ 0 & y \leq 0 \end{cases}$$

Damit (gleichwertig:) Zahl Ereignisse in beliebigem
Zeitintervall **Poisson-verteilt**

Beispiele: Ereignisse,
die zu "absolut zufälligem" Zeitpunkt
von jeweils einem Mitglied
großer Gesamtheit ausgelöst werden
(etwa: an Vermittlung eintreffende Telefonanrufe)

- ZV Y , welche Produkt einer größeren Anzahl zufälliger Einflüsse darstellt, könnte (Grenzwertsatz) **log-normal verteilt** sein,
LN(μ, σ^2)-verteilt

$$f_Y(y) = \begin{cases} \frac{1}{y \cdot \sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \exp\left\{-\frac{(\ln(y)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} & y > 0 \\ 0 & y \leq 0 \end{cases}$$

Insgesamt zu (a):

- Werte Verteilungsparameter?
- "wie gesagt", aus Stichprobe "schätzen"

vgl Abschnitt 5.2

zu (b): Explizite Bestimmung "Verteilungstyp" vermieden, stattdessen Verteilungsfunktion aus Stichprobe "direkt" geschätzt

Einschub:

In "verteilungsfreier" / "nichtparametrischer" Statistik häufig Verwendung von "Ordnungsstatistiken"

(order statistics):

Ordnungstatistik einer Stichprobe (Umfang n) ist Folge

$$(Y_{(1)}, Y_{(2)}, \dots, Y_{(n)})$$

der größtmäßig aufsteigend geordneten

Stichprobenvariablen Y_1, Y_2, \dots, Y_n

Folge $(y_{(1)}, y_{(2)}, \dots, y_{(n)})$

der größtmäßig aufsteigend geordneten

Stichprobenwerte y_1, y_2, \dots, y_n

ist Realisierung Ordnungstatistik

"Empirische Verteilungsfunktion" $F^*Y(y)$

wird aus Stichprobe (y_1, y_2, \dots, y_n) gewonnen:

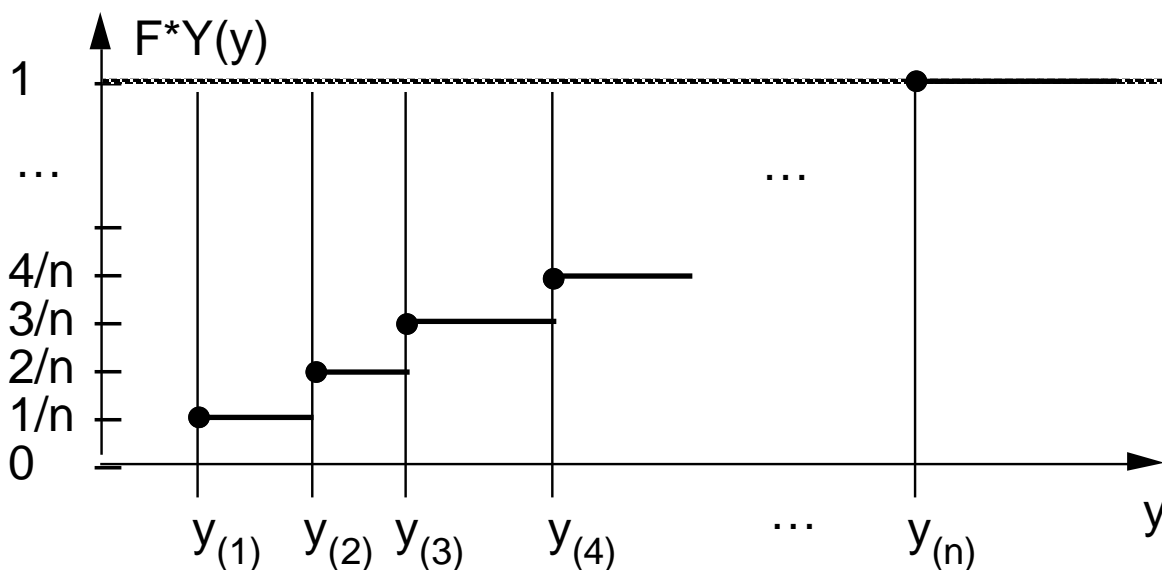
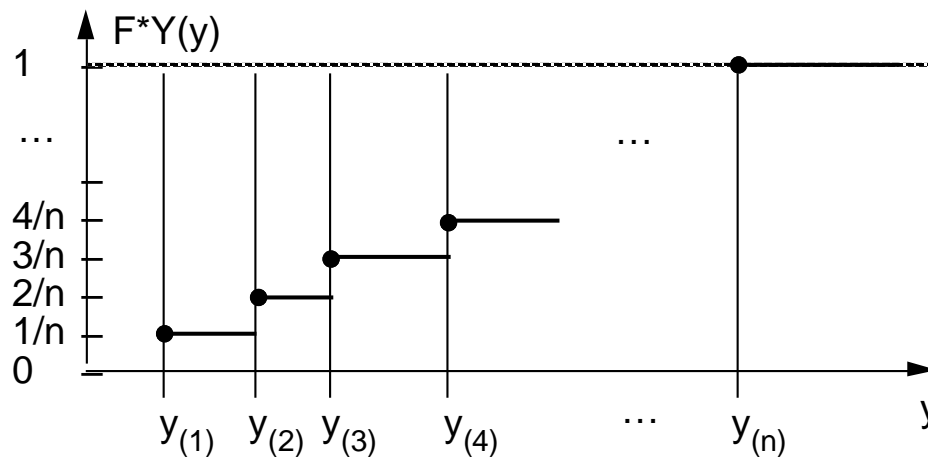


Abbildung 5.1.1: empirische Verteilungsfunktion

Empirische Verteilungsfunktion



schätzt Verteilungsfunktion erwartungstreu:

- aus Zeichnung:

$$\tilde{F}(Y) = \frac{|\{ \text{Realisierungen von } Y \leq y \mid n - \text{Stichprobe} \}|}{n}$$

s. Zeichnung

$$= \sum_1^n I_{Y \leq y} / n$$

wg. Unabhängigkeit

- wo "Indikatorfunktion":

$$I_{\alpha} := \begin{cases} 1 & \alpha \text{ wahr} \\ 0 & \alpha \text{ falsch} \end{cases}$$

- und damit:

$$\begin{aligned} E[\tilde{F}Y(y)] &= \frac{1}{n} \cdot n \cdot E[I_{Y \leq y}] \\ &= P[Y \leq y] \\ &= FY(y) \end{aligned}$$

Verwendung während Simulation:

Generierung von Realisierungen von Y gemäß $F^*Y(y)$

Wieder Anleihe bei "inverse Transformation" (Abschn. 3.3):

bei $[0,1)$ -gleichverteiltem U (+ Voraussetzungen \uparrow)
liefert $F_Y^{-1}(U)$ gemäß F_Y verteilte ZV

Als Rezept:

Ziehe u , dann ist jenes $y_{(i)}$ die gesuchte Realisierung,
für das gilt $F^*Y(y_{(i-1)}) \leq u < F^*Y(y_{(i)})$

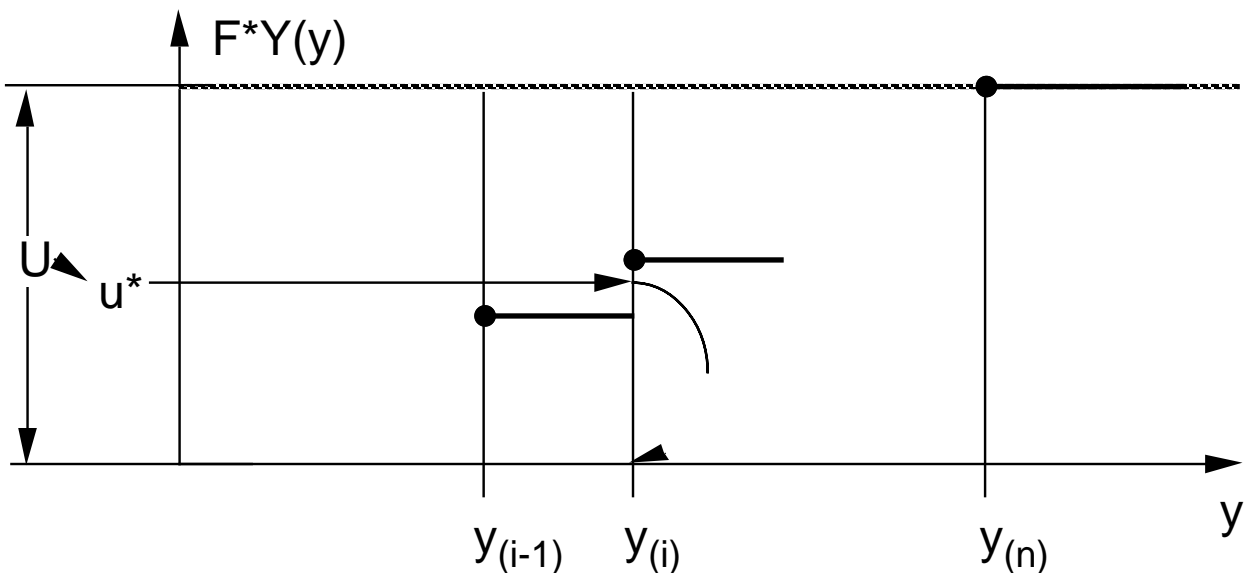


Abbildung 5.1.2: "Ziehen" aus
empirischer Verteilungsfunktion

bzw einfacher (identisches Ergebnis !):

alle Treppenstufen gleich hoch ($1/n$),
damit wegen gleichverteiltem U

- alle Werte $y_{(1)}, y_{(2)}, \dots, y_{(n)}$
 - bzw alle Werte y_1, y_2, \dots, y_n
- mit gleicher Wahrscheinlichkeit $1/n$ zu wählen

praktisch:

Ziehung aus diskret $[1, n]$ -gleichverteiltem U'
liefert direkt Position des gesuchten Wertes
in einem n -Feld mit Werten $y_{(1)}, y_{(2)}, \dots, y_{(n)}$
bzw y_1, y_2, \dots, y_n

Gelegentlich empfohlen:

lineare Interpolationen zur Definition von F^*Y
(auch Interpolationen höherer Ordnung)
klingt plausibel, zerstört aber Erwartungstreue!

Numerisch uU

zwei oder mehr Werte der Stichprobe identisch:

- Treppenstufen entsprechend höher,
- bzw beide (alle) Werte ins n -Feld

zu (c):

- Keine theoretisch fundierte Hypothese für Verteilungstyp, wohl aber Stichprobe verfügbar
- Versuch, Verteilungstyp aus Stichprobe zu "erahnen", zu "identifizieren"
- Auf diesem Weg erste Hinweise auf Ausschluß bestimmter Verteilungstypen auf Basis von (auf Momenten beruhenden) Verteilungscharakteristika

so etwa des **Variationskoeffizienten** $VK[Y]$

$$VK[Y] := \frac{\sqrt{\text{VAR}[Y]}}{E[Y]}$$

Bekannt sind Schätzer für Erwartungswert und Varianz (vgl. Abschn. 4.1):

$$\begin{aligned}\tilde{\mu}_1 &= \sum_i Y_i/n \\ \tilde{\sigma}^2 &= \sum_i (Y_i - \tilde{\mu}_1)^2 / (n-1)\end{aligned}$$

Natürlicher (nicht erwartungstreuer) Schätzer für VK wäre:

$$\tilde{\delta} := \sqrt{\tilde{\sigma}^2} / \tilde{\mu}_1$$

Da gewisse Verteilungstypen VK's nur bestimmter Wertebereiche zulassen (zB: <1 , >1), kann Schätzwert $\tilde{\delta}^*$ zum Ausschluß ganzer Verteilungsfamilien ausreichen

"ähnliche" Ausschlußhinweise vgl. zB LaKe00

- Subjektive ("visuell" geführte) Identifizierung Verteilungstyp mittels **Histogrammen** (Schätzer Dichtefunktion) (Verteilungsfunktion "visuell" schlecht einsetzbar)
- Weg:
 - vorhanden: Stichprobe (y_1, y_2, \dots, y_n)
 - bilde "Klassen" von Wertebereichen $[b_0, b_1), [b_1, b_2), \dots, [b_{k-1}, b_k)$ gleicher Breite $\Delta b = b_j - b_{j-1} \quad j=1, 2, \dots, k$
 - bestimme relative Häufigkeiten $r_j := \frac{\#y_i \text{'s in } [b_{j-1}, b_j)}{n} \quad j = 1, 2, \dots, k$ und zeichne "Histogramm":

$$HY(y) := \begin{cases} 0 & y < b_0 \\ r_j & b_{j-1} \leq y < b_j \\ 0 & y \geq b_k \end{cases}$$

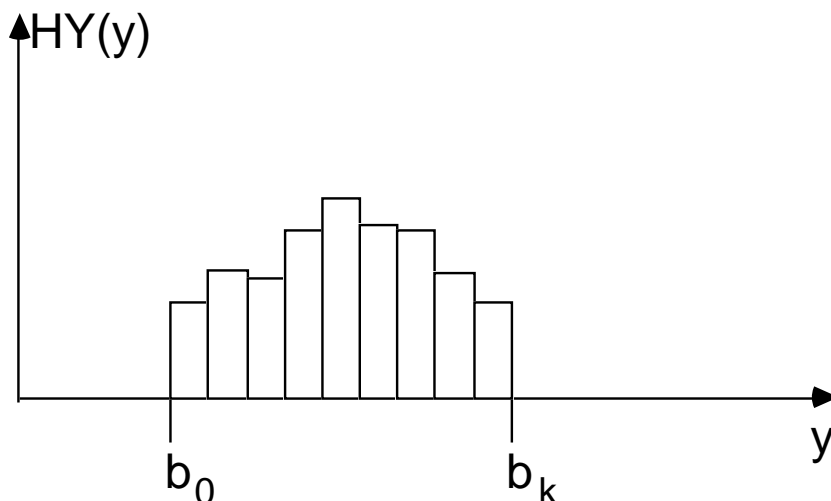


Abbildung 5.1.3: Histogramm

- Histogramm:
 - Aussehen sehr abhängig von Δb und Lage b_0 ,
mehrere Alternativen "probieren"!
 - alle Intervalle sollten "hinreichende" Anzahl enthalten,
Rat: > 5 ??
 - $[b_0, b_k)$ muß nicht alle y_i enthalten,
"outlier" uU vernachlässigen
- Histogramm $HY(y)$ schätzt Dichte $fY(y)$
(bis auf Konstante):
 - einerseits ist

$$P[b_{j-1} \leq Y < b_j] = \int_{b_{j-1}}^{b_j} fY(y) dy$$

$$= \Delta b \cdot fY(y'_j)$$
 mit (Mittelwertsatz:) einem $y'_j \in [b_{j-1}, b_j]$
 - andererseits ist für $y' \in [b_{j-1}, b_j]$

$$HY(y') = r_j$$
 mit

$$E[R_j] = P[b_{j-1} \leq Y < b_j]$$
 - so daß

$$r_j \approx \Delta b \cdot fY(y'_j)$$
 und HY zu fY ungefähr proportional
 - und somit $HY(y)/\Delta b$ Schätzer $\tilde{fY}(y)$ für Dichte $fY(y)$
- Aus dem Bild (Histogramm) nun
(subjektiv und erfahrungsabhängig)
Typ einer uU zugrundeliegenden Verteilung identifizieren

Jede (analytisch charakterisierte) Verteilungsfamilie weist gewisse Parameter auf,

hier erfaßt durch Parametervektor Θ

(zB: N: μ, σ EXP: λ)

Werte dieser Parameter (nach Identifizierung V-Familie) noch zu bestimmen (schätzen) - analog Situation a) -

Diesbezügliche Verfahren vgl Abschn. 5.2

uU kann schon vor Parameterschätzung

Hypothese V-Typ verworfen werden;

so bei V-Familien, deren Mitglieder ausschließlich über

- Translation
- Dehnung / Stauchung

auseinander hervorgehen; zB: N

Dazu (wieder) "visuelle" Methode: probability plot

- Grundidee probability plot: Vergleich der Quantile zweier Verteilungen
- dabei q -Quantil y_q ($0 < q < 1$) der Verteilung einer ZV Y definiert über

$$FY(y_q) = q$$
 dh bei kontinuierlichem, streng monotonem FY

$$y_q := FY^{-1}(q)$$
- zwei ZV X, Y genau dann identisch verteilt, wenn all ihre Quantile x_q, y_q übereinstimmen

Graph x_q versus y_q ist dann (Ursprungs-) Gerade (mit Steigung 1)

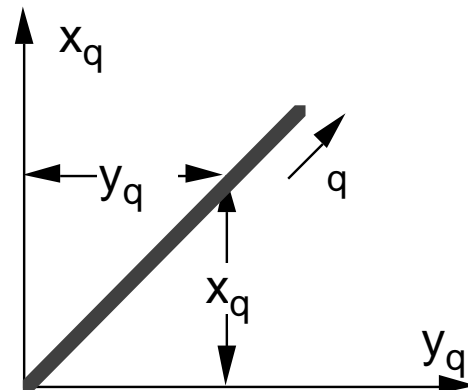


Abbildung 5.1.4

- hängen X und Y über lineare Transformation

$$X = a \cdot Y + b \quad a > 0$$
 zusammen, dann

$$\begin{aligned}
 FX(x) &= P[X \leq x] \\
 &= P[a \cdot Y + b \leq x] \\
 &= P\left[Y \leq \frac{x-b}{a}\right] \\
 &= FY\left(\frac{x-b}{a}\right)
 \end{aligned}$$

und Graph x_q versus y_q ist Gerade (aus der sogar a und b abschätzbar)

- konkrete Aufgabe hier:

visueller Vergleich

- empirische Verteilungsfunktion $F^*Y(y)$
aus Stichprobe
- hypothetische, analytische Verteilungsfunktion $FY(y)$
aus visueller Identifikation

auf Basis jeweiliger Quantile

- y^*_q für $F^*Y(y)$
- y_q für $FY(y)$

Falls Hypothese: $F^*Y(y) = FY(y)$ zutreffend,
sollte Graph y_q versus y^*_q (= "probability plot")
Ursprungsgerade der Steigung 1 ähneln

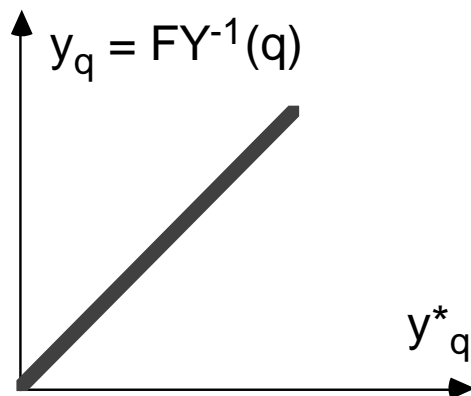


Abbildung 5.1.5: probability plot

- für konkrete Aufgabe
ist (entsprechend Annahmen)
 - i/n -Quantil der Y^* -Vert'g gleich $y_{(i)}$ (Abszisse)
 - i/n -Quantil der Y -Vert'g gleich $FY^{-1}(i/n)$ (Ordinate)

Zu inspizierender Graph hat Aussehen:

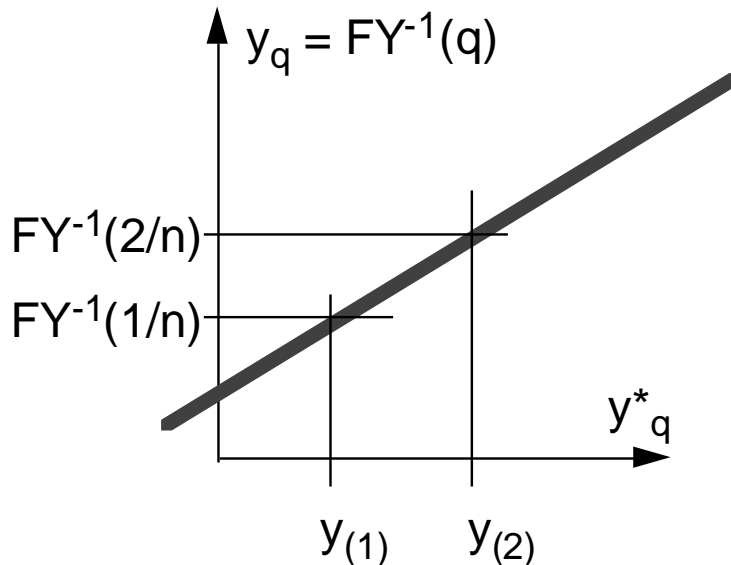


Abbildung 5.1.6: probability plot als Beurteilungsgraph

- danach
 - Hypothese $F^*Y(y) = FY(y)$
nicht abzulehnen,
falls Punkte "so ungefähr" auf Winkelhalbierender
 - Hypothese $F^*Y(y)$ und $FY(y)$ nur durch
Translationsparameter a und
Dehnungsparameter b unterschieden
nicht abzulehnen,
falls Punkte "so ungefähr" auf Gerade
- sonst:** Hypothese ablehnen,
"Ahnung $FY(y)$ war falsch"

5.2 Schätzung von Verteilungsparametern

Sei Y kontinuierliche Zufallsvariable,
(für diskrete ZV: vgl Literatur)

- deren Verteilungstyp bekannt / identifiziert sei
(zumindest im Sinne "wohlbegründeter" Hypothese,
vgl Abschn. 5.1),
etwa durch funktionale Form ihrer Dichte

$$f_Y(y; \underline{\Theta})$$

- deren Parameter

$$\underline{\Theta} = (\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_p)$$

aber nicht bekannt,
also zu bestimmen sind,

⇒ zu schätzen sind aus vorliegender Y -Stichprobe

$$(y_1, y_2, \dots, y_n)$$

Für Aufgabe verfügbar diverse statistische Verfahren,
hier vorgestellt:

- Momentenmethode
- maximum likelihood Methode

Momentenmethode

- bedient sich der k-ten Momente von Y

$$\mu_k := E[Y^k]$$

bzw ihrer erwartungstreuen Schätzer (vgl Abschn. 4.1)

$$\tilde{\mu}_k := \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Y_i^k$$

bzw diesbezüglicher Schätzwerte μ_k^*

- Parameter Θ_j lassen sich oft ausdrücken als Funktionen der Momente

$$\Theta_j = \Phi_j(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p) \quad j = 1, 2, \dots, p$$

- Momentenmethode

- substituiert (in diesen Funktionen)

Momentenschätzer für Momente

- gewinnt so **Parameterschätzer**

$$\tilde{\Theta}_j = \Phi_j(\tilde{\mu}_1, \tilde{\mu}_2, \dots, \tilde{\mu}_p) \quad j = 1, 2, \dots, p$$

- gewonnene Schätzer nicht notwendig erwartungstreu, meist asymptotisch erwartungstreu und konsistent

(Erinnerung:

Schätzer $\tilde{\Theta}$ für Größe Θ heißt

- erwartungstreu, wenn $E[\tilde{\Theta}] = \Theta$

- asymptotisch erwartungstreu, wenn $\lim_{n \rightarrow \infty} E[\tilde{\Theta}] = \Theta$

- konsistent, wenn $\lim_{n \rightarrow \infty} P[|\tilde{\Theta} - \Theta| > \varepsilon] = 0 \quad \forall \varepsilon > 0$)

oft dennoch keine "guten" Schätzer ("Form" Verteilung)

Beispiel: Exponentialverteilung

- Dichtefunktion:

$$f_Y(y;\lambda) = \begin{cases} \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot y) & y \geq 0 \\ 0 & y < 0 \end{cases}$$

- erstes Moment:

$$\mu_1 = \int_0^{\infty} y \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda y} dy$$

partielle Integration

$$= \lambda \cdot \left[-y \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\lambda y} + \left(\frac{1}{\lambda} \right) \cdot \int e^{-\lambda y} dy \right]_0^{\infty}$$

$$= \left[-y \cdot e^{-\lambda y} + \left(-\frac{1}{\lambda} \right) \cdot e^{-\lambda y} \right]_0^{\infty}$$

$$= \left[-e^{-\lambda y} \cdot \left(y + \frac{1}{\lambda} \right) \right]_0^{\infty}$$

$$\mu_1 = \frac{1}{\lambda}$$

- (folglich) Zusammenhang
(erstes) Moment (μ_1) vs (einziger) Parameter (λ):

$$\lambda = 1/\mu_1$$

- Parameterschätzer, mit Momentenschätzer (4.1.4) :

$$\tilde{\lambda} = n / \sum_{i=1}^n Y_i$$

maximum likelihood Methode

- Erinnerung:
 - Parameter $\underline{\Theta}$ der Verteilung einer ZV Y , deren Typ bekannt, zB als Dichte $f_Y(y; \underline{\Theta})$, zu schätzen aus Stichprobe $(y_1^*, y_2^*, \dots, y_n^*)$ (* für Stichprobenwerte zur Unterscheidung, wo nötig)
 - Stichprobe zu sehen als Realisierung einer mehrdimensionalen ZV $\underline{Y} := (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$
 - alle Stichprobenvariablen identisch verteilt:

$$f_{Y_i}(y_i; \underline{\Theta}) \equiv f_Y(y_i; \underline{\Theta}) \quad i = 1, 2, \dots, n$$
 - alle Stichprobenvariablen unabhängig verteilt:

$$f_{\underline{Y}}(\underline{y}; \underline{\Theta}) = \prod_1^n f_Y(y_i; \underline{\Theta})$$
 wo $\underline{y} := (y_1, y_2, \dots, y_n)$

- Idee der Methode:

Parametervektor $\underline{\Theta}$ so wählen (bestimmen), daß Beobachtung $(y_1^*, y_2^*, \dots, y_n^*)$ in den Punkt maximaler Dichte,

– Maximum von $f_{\underline{Y}}(\underline{y}; \underline{\Theta})$ –

zu liegen kommt

Motivation: Umgebung dieses Punktes ist Bereich größter Beobachtungswahrscheinlichkeit

- Weg:

- Maximierung der **maximum-likelihood-Funktion**

$$L(\underline{\Theta}) := \prod_1^n f_Y(y_i; \underline{\Theta})$$

bezüglich Komponenten des Vektors $\underline{\Theta}$

- notwendige Bedingung für Maximum mehrdimensionaler, differenzierbarer Funktion (sei für gemeinsame Dichte $L(\underline{\Theta})$ vorausgesetzt) ist

$$\left(\frac{\partial L}{\partial \Theta_j} \right) = (0)$$

woraus p Bestimmungsgleichungen für die Θ_j $j = 1, 2, \dots, p$ folgen

- uU muß explizit auf Vorliegen Maximum / Minimum / Sattelpunkt geprüft werden

- diese Beziehungen

$$\tilde{\Theta}_j := l_j(\underline{y}) \quad j = 1, 2, \dots, p$$

liefern, nach Substitution

des Stichprobenvektors \underline{y}^*

für den Variablenvektor \underline{y}

die gesuchten **maximum-likelihood-Schätzwerte**

$$\Theta_j^* := l_j(\underline{y}^*) \quad j = 1, 2, \dots, p$$

- praktische Anwendung

- Logarithmus $\log(L(\underline{\Theta}))$ der likelihood-Funktion, sog. **log-likelihood-Funktion**

$$\begin{aligned}\log(L(\underline{\Theta})) &= \log\left(\prod_1^n f_Y(y_i; \underline{\Theta})\right) \\ &= \sum_1^n \log(f_Y(y_i; \underline{\Theta}))\end{aligned}$$

hat wegen Monotonie der Logarithmus-Funktion Maximum an derselben Stelle wie likelihood-Funktion

- $\log(L(\underline{\Theta}))$ wird zur Bestimmung des Maximums, daraus folgend der Schätzer $\tilde{\Theta}_j$ wegen "leichterer" Differenzierbarkeit (Summe !) gern anstelle $L(\underline{\Theta})$ verwendet
- ist das Gleichungssystem zur Bestimmung der Schätzer $\tilde{\Theta}_j$ nicht explizit lösbar, kann Maximum auch auf numerischem Weg ermittelt werden

- maximum-likelihood-Schätzer

- sind (erneut) nicht notwendig erwartungstreu, aber meist konsistent
- besitzen zusätzlich (unter gewissen Voraussetzungen) die (wünschenswerte) Eigenschaft minimal möglicher (asymptotischer) Varianz (vgl Fish73, Mihr72, LaKe82)

Beispiel: (wieder) Exponentialverteilung

- Dichtefunktion:

$$f_Y(y;\lambda) = \begin{cases} \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot y) & y \geq 0 \\ 0 & y < 0 \end{cases}$$

- log-likelihood Funktion:

$$\log L = \sum_1^n \log(\lambda \cdot e^{-\lambda \cdot y_i})$$

- partiell differenziert (einziger Parameter ist λ)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \log L}{\partial \lambda} &= \sum_1^n \frac{\lambda \cdot (-y_i) \cdot e^{-\lambda \cdot y_i} + e^{-\lambda \cdot y_i}}{\lambda \cdot e^{-\lambda \cdot y_i}} \\ &= \sum_1^n \frac{1 - \lambda \cdot y_i}{\lambda} \end{aligned}$$

- Maximumbedingung:

$$\frac{\partial \log L}{\partial \lambda} = 0 \quad n - \lambda \cdot \sum y_i = 0$$

- daraus Parameterschätzer und Parameterschätzwert

$$\tilde{\lambda} = n / \sum Y_i \quad \lambda^* = n / \sum y_i^*$$

- es ist "purer Zufall", daß in diesem Fall
Momentenschätzer
und **MLE** (maximum likelihood estimator)
übereinstimmen

5.3 Überprüfung der Paßgüte angepaßter Verteilungen

Modellierung ZV umfaßte (falls analytische Form gefragt)

- (i) Identifizieren Verteilungstyp
(aus Theorie, durch intelligentes "Raten",...)
- (ii) Schätzen Verteilungsparameter
(aus Stichprobe, vgl Abschn. 5.2)

Man sollte

- (iii) - sich vergewissern, ob (und wie "gut")
gefundene Verteilungsform (samt Parameterwerten)
mit Basisdaten übereinstimmt
- entscheiden können, welche
von uU mehreren Alternativen aus (i,ii)
im Hinblick auf "Paßgüte" vorzuziehen

Beispielsweise aus vorliegender Stichprobe
(zB über Histogramm) für "CPU-Anforderungen von jobs
(in Zeiteinheiten)"

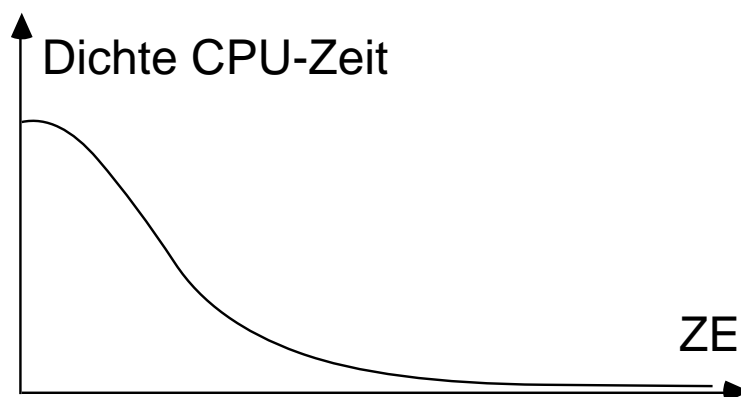


Abbildung 5.3.1: "erahnte" Dichte CPU-Zeit-Verteilung

Frage:

Exponentialverteilung oder Hyperexponentialverteilung
oder Hypoexponentialverteilung oder COX-Verteilung
oder Weibull-Verteilung

wählen ??

- Überprüfung anhand Stichprobe kann, wegen deren "statistischen Schwankens", immer zu falschen Folgerungen führen; dabei zwei "Typen" von "Fehlern" zu unterscheiden

Fehlertypen

- (i) (statistischer) **Fehler 1.Art** (α -Fehler)
wenn Entscheidung zugunsten H_1 getroffen, obwohl de facto H_0 gegeben
bedeutet: **fälschliches Verwerfen** (der Nullhypothese)
- (ii) (statistischer) **Fehler 2.Art** (β -Fehler)
wenn Entscheidung zugunsten H_0 getroffen, obwohl de facto H_1 gegeben
bedeutet: **fälschliches Akzeptieren** (der Nullhypothese)

Impliziert ein bestimmter Test mit Wahrscheinlichkeit $\leq \alpha$ Fehler 1. Art, heißt er "Test zum Niveau α " (auch: "Niveau α -Test") (wo Niveau kurz für **Signifikanzniveau**), unabhängig von Wahrscheinlichkeit β eines Fehlers 2. Art

"Gütefunktion" / "Operationscharakteristika" / "power" von Tests zielen auf Aussagen über β (bei gegebenem α); häufig wenig darüber bekannt

Entscheidungsverfahren meist so, daß

Teststatistik $S(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$
 dh Funktion der Stichproben -Variablen,
 beim Einsatz: -Werte

festgelegt, deren Werte

$$s(y_1, y_2, \dots, y_n)$$

umso größer sind, je unwahrscheinlicher H_0 ist
 (und implizit: je wahrscheinlicher H_1 ist)

bei Vorliegen dieser Stichprobe

Zur Anwendung erforderlich:

- Bestimmung der Verteilung von S
 unter der Voraussetzung: H_0 zutreffend
- Ermittlung von "kritischen Werten" c_α
 (bzw $c_{1-\alpha}$: Vorsicht in Tafeln !)
 ab denen H_0 zum Niveau α zu verwerfen

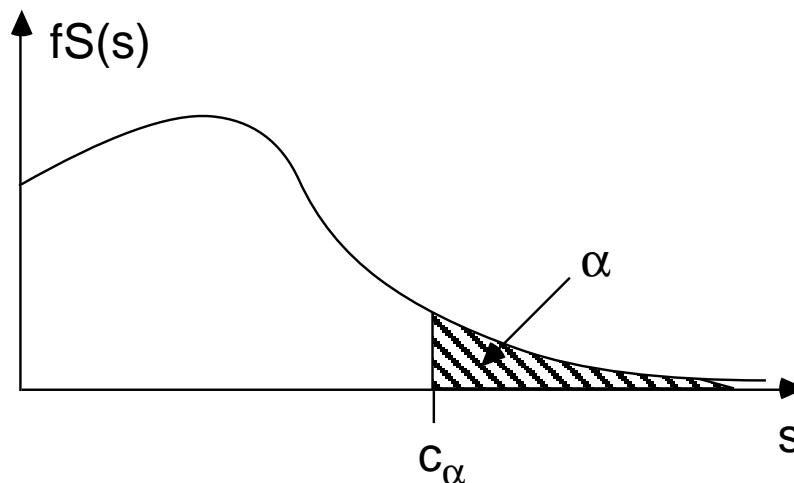


Abbildung 5.3.2: Prinzipalskizze statistische Tests

nochmals:

Bestimmung c_α derart, daß $P[S > c_\alpha \mid H_0] = \alpha$

oft spezielle Wahlen für α -Werte:

$\alpha = 0.05$ "signifikant"

$\alpha = 0.01$ "hochsignifikant"

5.3.1 Der Chi-Quadrat- (χ^2 -) Test

Vorbereitung:

- Chi-Quadrat- (χ^2 -) Verteilung
ist in Statistik häufig verwendete Verteilungsfamilie

- Definition:

Seien Y_1, Y_2, \dots, Y_k

k unabhängige, identisch $N(0,1)$ -verteilte ZV, dh

$$f_{Y_i}(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) \quad i = 1, 2, \dots, k$$

Dann ist

$$Y = \sum_{i=1}^k Y_i^2 \quad \text{wieder ZV,}$$

hat Verteilung ("so benannt")

χ^2 -Verteilung mit k Freiheitsgraden

- Familie der χ^2 -Verteilung liegt tabelliert vor
(keine explizite funktionale Form für Verteilungsfunktion)

Idee χ^2 -Test:

- liege vor Stichprobe
 $\underline{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$
dh n Beobachtungen einer ZV Y mit Dichte $f_Y(y)$
- werden Beobachtungen einsortiert
in geschlossene Folge von Intervallen
 $[b_0, b_1), [b_1, b_2), \dots, [b_{k-1}, b_k)$

(analog Histogramm,

aber gleiche Intervallbreiten nicht erforderlich)

- und werden Beobachtungen je Intervall gezählt

$$z_i := \left| \left\{ y_j : b_{i-1} \leq y_j < b_i \right\} \right| \quad i = 1, 2, \dots, k$$

- dann sollten relative Häufigkeiten

$$r_i := z_i/n \quad i = 1, 2, \dots, k$$

für hinreichend große Stichprobe (großes n) nahe theoretischen Wahrscheinlichkeiten

$$p_i := \int_{b_{i-1}}^{b_i} f_Y(y) dy$$

des Einnehmens dieser Intervalle liegen

- Differenzen

$$z_i - n \cdot p_i$$

liefern Maße der Abweichungen je Intervall, ihr gewogenes quadratisches Mittel

$$d := \sum_{i=1}^k \frac{(z_i - n \cdot p_i)^2}{n \cdot p_i}$$

ist (ein) mögliches Maß der "Gesamtabweichung"

- Erwartung:

je kleiner d , desto geringer Abweichung
analytische Verteilung / Beobachtungen
und umgekehrt

bzw:

je kleiner d , desto wahrscheinlicher
ist y tatsächlich aus $f_Y(y)$ gezogen

- jetzt die (standardmäßige) Überlegung:

wenn y tatsächlich aus $f_Y(y)$ gezogen wird,
 welche Werteintervalle nimmt die ZV D
 (d ist deren Realisierung)
 mit welchen Wahrscheinlichkeiten ein?

m.a.W.:

Wie ist die Verteilung von D unter Hypothese $F_Y(y)$?

- Fallunterscheidung

- sind Parameter der analytischen Y -Verteilung unabhängig von Stichprobe ermittelt (also **nicht** aus dieser geschätzt),

dann läßt sich zeigen, daß

D asymptotisch χ^2_{k-1} -verteilt

(für hinreichend große n approximativ χ^2_{k-1} -verteilt)

$f_D(d)$ also bekannt

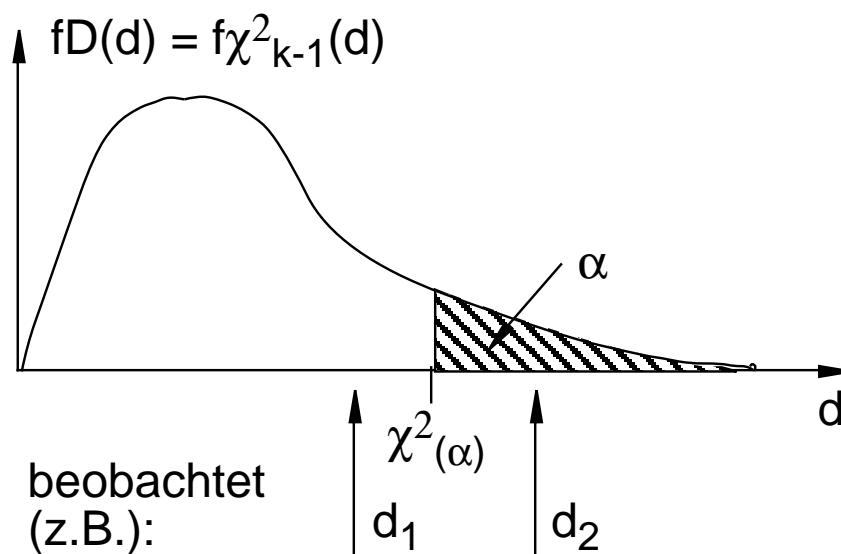


Abbildung 5.3.3: Skizze Entscheidungsverfahren

- Realisierungen d von D (errechnete Abw.maße), die $d > \chi^2(\alpha)$ erfüllen, treten bei zutreffender Hypothese auf mit Wahrscheinlichkeit

$$\alpha = \int_{\chi^2(\alpha)}^{\infty} f_{\chi^2_{k-1}}(x) dx$$

- d -Werte, die (bei zutreffender Hypothese) in lediglich wenig wahrscheinlichen Intervallen liegen
zB $d > \chi^2(0.1)$, $d > \chi^2(0.05)$
als Grund interpretiert, **Hypothese zu verwerfen**
(in Bsp.Skizze: d_2)
- dabei in Kauf zu nehmen, daß mit gewisser W' keit
zB in 10% 5%
aller Fälle (aller Schätzvorgänge)
Verwerfung fälschlicherweise vorgenommen (Typ 1 !)
- kleinere d -Werte:
kein Anlaß, zu verwerfen,
default: **Hypothese zu akzeptieren**
(in Bsp.Skizze: d_1)
- dabei mit Typ 2 Fehlerwahrscheinlichkeit
fälschlich akzeptiert
- kritische Werte aus Tabellen (Vorsicht: α vs $1-\alpha$)

- Entscheidungsverfahren für letzteren Fall

Beispiel: $k=11$, $p=2$, $\alpha=0.05$

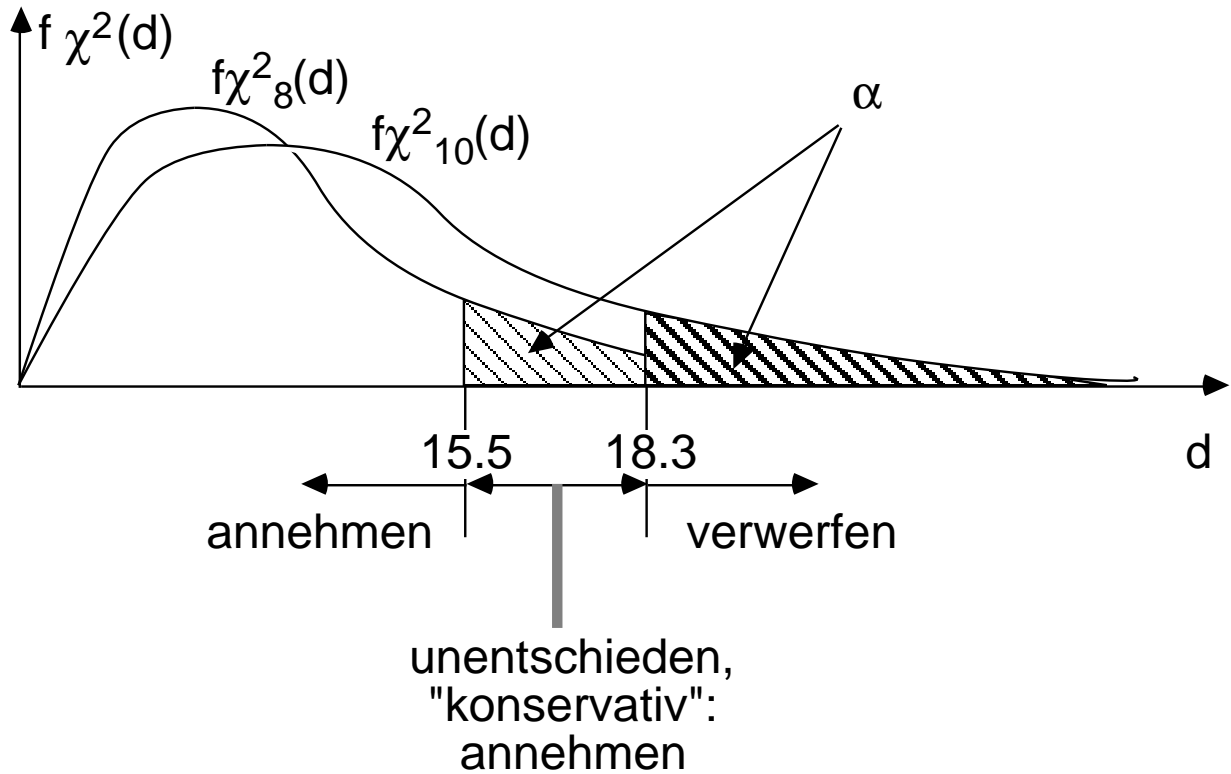


Abbildung 5.3.4: Skizze Entscheidungsverfahren

im "unentschiedenen" Fall

(irgendwo dort liegt der wahre kritische Wert):

ist sog "konservative" Entscheidung:

"zögern zu verwerfen" → annehmen

damit aber Typ 2 Fehler automatisch größer

Unterschied in praktisch häufigen Fällen

(p eher klein, k eher groß)

ohnehin gering

- Praktische Hinweise
(χ^2_{k-1} -Verteilungen nur asymptotisch richtig)
 - Intervalle nicht zu klein wählen,
damit hinreichend viele Beobachtungen je Intervall

(oft kolportierte) Faustregel: $z_i > 5$ (>10 , >20 ?)

bei (Voraus-) Intervallfestlegung also

$$n \cdot p_i > 5$$

wählen, dh

$$5 < n \cdot \int_{b_{i-1}}^{b_i} f_Y(y) dy = n \cdot (F_Y(b_i) - F_Y(b_{i-1}))$$

zB alle Intervalle gleichwahrscheinlich

$$p_i \equiv 1/k \quad i = 1, 2, \dots, k$$

und damit

$$5 < n/k, \quad n > 5 \cdot k, \quad k < n/5$$

- selbst bei vielen Daten Zahl Intervalle < 30
- i.allg.: für große Stichproben geeignet
auch für diskrete Verteilungen anwendbar
auch bei Parameterschätzung anwendbar

5.3.2 Der Kolmogoroff-Smirnoff-Test

- Grundidee:
 - empirische Verteilungsfunktion aus einer n-Stichprobe ist Treppenkurve (vgl Abschn. 5.1):

$$F^*Y(y) = (\#y_i \leq y)/n \quad (\text{"\#"} \text{ für "Anzahl"})$$
 - Abweichung
 - zwischen $F^*Y(y)$ aus Stichprobe
 - und $FY(y)$ hypothetischerweise zugrundeliegende Verteilungsfkt.
 sollte als Maß der "Paßgüte" brauchbar sein;
 "Abweichung" noch zu definieren
- Abweichung im Kolmogoroff-Smirnoff- (KS-) Sinn ist maximaler Abstand zweier Verteilungsfunktionen
 - Testgröße KS-Test (als Anpassungstest) bei n-Stichprobe ist entsprechendes

$$D_n := \max_y | F^*Y(y) - FY(y) |$$
 (größter vertikaler Abstand der Funktionen,
 wo nötig, mit "sup" statt "max" definiert)
 - auch: $d_n := g(n, D_n)$
 - (mit speziellen Funktionen $g(\dots)$, vgl unten)
 - Testhypothese
 - $H_0: F^*Y(y) = FY(y) \quad \text{für alle } y$
 - Alternativhypothese
 - $H_1: F^*Y(y) \neq FY(y) \quad \text{für wenigstens ein } y$

- Durchführung

Fallunterscheidungen:

- falls Parameter von $F_Y(y)$ **nicht** aus Stichprobe, ist Verteilung von D_n (unabhängig vom Typ der Verteilung von Y) bekannt und kritische Werte vertafelt

approximativer Test durchführbar mit

$$d_n := (\sqrt{n} + 0.12 + 0.11/\sqrt{n}) \cdot D_n$$

und einer (von n unabhängigen)

Tafel kritischer Werte $\{c_\alpha\}$ vgl LaKe82

wie üblich, H_0 zu verwerfen falls

$$d_n > c_\alpha \quad (\text{wo zB } \alpha = 0.1, 0.05, 0.01)$$

- falls Parameter von $FY(y)$ aus Stichprobe geschätzt,
(und D_n sicher von Verteilungstyp abhängig)
ist D_n -Verteilung nur bekannt für spezielle Y-Vert'gen
so für: vgl LaKe82
- * Normalverteilung (μ^*, σ^{*2} erwartungstreu geschätzt)
mit approximativer Testgröße
$$d_n' := (\sqrt{n} - 0.01 + 0.85/\sqrt{n}) \cdot D_n$$

und zugehörigen kritischen Werten (Tafel) $\{c'_\alpha\}$
- * Exponentialverteilung (μ^* erwartungstreu geschätzt)
mit approximativer Testgröße
$$d_n'' := (\sqrt{n} + 0.26 + 0.5/\sqrt{n}) \cdot (D_n - 0.2/n)$$

und zugehörigen kritischen Werten (Tafel) $\{c''_\alpha\}$
- * Weibull-Verteilung (vgl Literatur)