

**Einführungsvortrag zum  
Proseminar Datenkompression  
im Wintersemester 2006/2007**

**Dr. Ralf Schlüter**

**Lehrstuhl für Informatik 6  
RWTH Aachen  
52056 Aachen  
[schlueter@cs.rwth-aachen.de](mailto:schlueter@cs.rwth-aachen.de)**

- Einführung**
  - Anwendungsbereiche
  - Motivation
  - Beispiele
  
- Methodik**
  - Verlustlos vs. verlustbehaftet
  - Performanzbewertung
  - Ansätze
  - Vorgehensweise
  
- Statistik**
  - Grundbegriffe und Konzepte
  - Stochastische Prozesse
  
- Information**
  - Definition
  - Modellierung
  - Kodierung

### Anwendungen für Datenkompression:

- Internet
- Telekommunikation
- Videokommunikation

### Undenkbar ohne Datenkompression:

- Bild-, Audio- und Videoinformation im Internet
- Hochqualitative Mobiltelefonie
- Digital-TV

## Warum Datenkompression?

- Ergänzung zu Verbesserungen in Speichertechnologie und Datenübertragung
- Informationsbedarf steigt stärker als verfügbare Ressourcen
- Physikalische Grenzen für Speicher- und Übertragungskapazitäten

### Jedoch:

- Komprimierbarkeit ist auch begrenzt (Entropie!)

### Morse Kodierung:

- **kürzere** Repräsentationen für **häufigere** Zeichen
- z.B.:  
SOS    ... --- ...    (9 bit)  
AND    .- -. -..    (7 bit)  
DATE    -.. .- - .    (7 bit)

### Braille Kodierung:

- 6 bit pro Zeichen sowie **häufigste Wörter**
- z.B.:  
AND    ⠠⠠⠠    (6 bit)  
DATE    ⠠⠠⠠⠠    (24 bit)
- Anwendung: Blindenschrift

## Verlustlose Kompression:

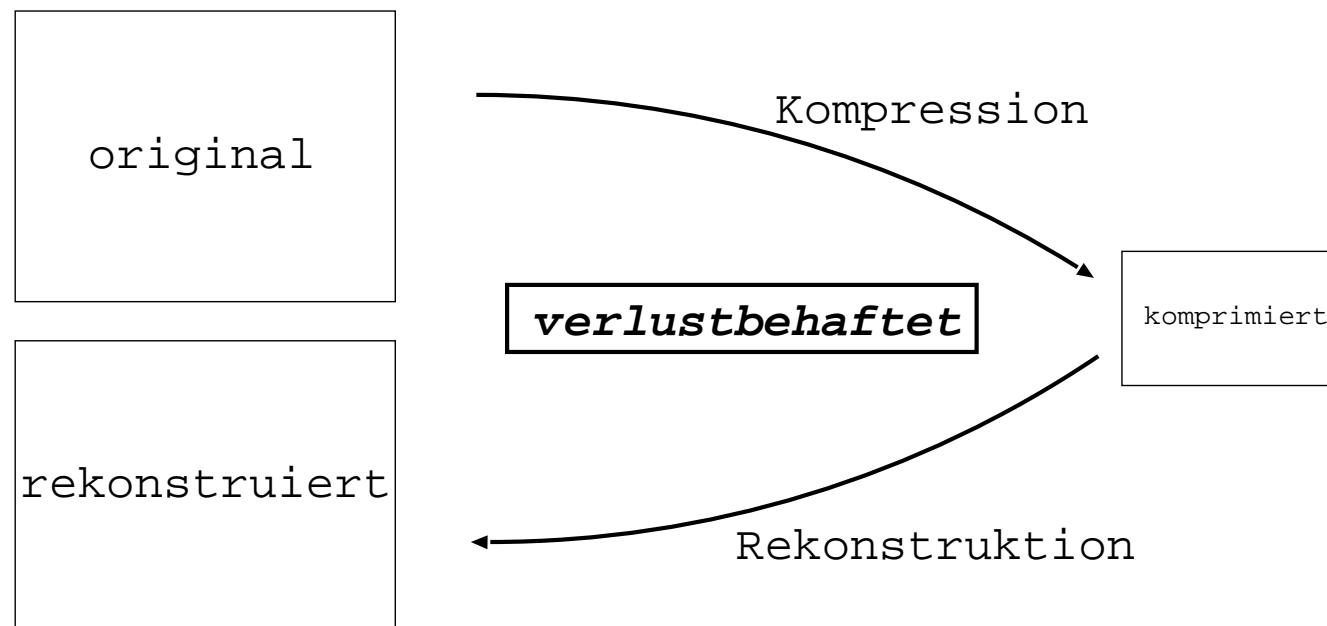
notwendig für z.B.:

- Text-Daten (“Do not **t** jump!” vs. “Do now **w** jump!”)
- System-Daten
- Bank-Daten
- Verhinderung von Artefakten bei Weiterverarbeitung



### Verlustbehaftete Kompression:

- höhere Kompressionsraten möglich
- Redundanz der Originaldaten
- Informationsgehalt vs. Perzeptionsgrenzen bzw. Akzeptanz



## Performanzbewertung

- Maß der Kompression:
  - Kompressionsrate:  $\frac{\text{Anzahl Bits im Original}}{\text{Anzahl Bits nach Kompression}}$
  - Normiert: z.B. für Bilder in Bits pro Pixel
- Verlustbehaftet: zusätzlich Qualitätsmaße
  - Verzerrung: Ähnlichkeit zum Original
  - Sprache, Video: menschliche Perzeption
  - Mathematische Modellierung der menschlichen Perzeption

## Ansätze für Kompression:

- **Statistik, z.B.:**
  - Häufigkeit einzelner Symbole (z.B. Huffman, arithmetisch)
  - Häufigkeit von Symbolfolgen/Wörtern (z.B. string-basiert)
  - Berücksichtigung von Kontext (z.B. prädiktiv)
  
- **Physikalische Strukturierung, z.B.:**
  - Sprache: Vokaltraktparameter statt Abtastwerte
  
- **Wahrnehmungs-Orientierung, z.B.:**
  - Sprache: Abtastrate angepasst an Verständlichkeit
  - Bilder: Auflösung angepasst an Perzeptionsgrenzen
  - Film: Bildrate angepasst an Fähigkeit, aufeinanderfolgende Bilder explizit zu unterscheiden

## Wahl der Kompressionsmethode:

- Finden von Redundanzen
- Modellierung (von Redundanzen), z.B.:
  - Statistisch
  - Gruppierung
  - Prädiktion
  - Funktional
  - Transformation
- Kodierung, z.B.:
  - Statistisch, z.B.:
    - \* variable Kodewortlänge
    - \* Gruppierung
  - Modellparameter
  - + Abweichung vom Modell (Residuum)

### Wahrscheinlichkeit:

- Beschreibung von Ereignissen
- Erwartungsmaß; z.B. Häufigkeit
- Axiomatische Definition: Positivität, Normierung und Additivität
- Unabhängigkeit / Bedingtheit
- Bezeichnungen:
  - a-priori Wahrscheinlichkeit:  $p(B)$
  - a-posteriori Wahrscheinlichkeit:  $p(A|B)$
  - Verbundverteilung:  $p(A, B) = p(A \cup B) = p(A|B) \cdot p(B)$
  - Randverteilung:  $p(B) = \sum_A p(A, B)$

### Ereignisse:

- mögliche Werte einer Zufallsvariablen, z.B.:
  - Ergebnisse eines Würfelwurfs
  - Zeichen, Wörter oder ganze Sätze
  - Orte eines Meteoriteneinschlags
- diskret oder kontinuierlich
- Gruppierung / Verfeinerung

**Wichtige Begriffe und Konzepte:**

- **Bayessche Identität:** 
$$p(A|B) = \frac{p(A, B)}{p(B)} = \frac{p(A \cup B)}{p(B)}$$
- **kumulative Verteilungsfunktion:** 
$$p(x \leq x_0) = \int_{-\infty}^{x_0} p(x) dx$$
- **Erwartungswerte:** 
$$E\{f(x)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)p(x) dx \quad \text{(kontinuierlich)}$$
  
$$E\{f(x)\} = \sum_i f(x_i)p(x_i) \quad \text{(diskret)}$$
- **Mittelwert:** 
$$\mu = E\{x\}$$
- **Varianz:** 
$$\sigma^2 = E\{(x - \mu)^2\} = E\{x^2\} - E\{x\}^2$$

## Stochastische Prozesse:

- statistische Modellierung von **Zeitreihen**, z.B.:
  - Niederschlagsmenge
  - Stromverbrauch
  - Radioaktiver Zerfall
  - Sprache
  - Video-Sequenzen

- zeitabhängige Zufallsvariable

- Autokorrelation:

$$R_{xx}(t_1, t_2) = E\{x(t_1) \cdot x(t_2)\}$$

- Stationarität: statt expliziter nur noch relative Zeitabhängigkeit

$$R_{xx}(t_1, t_2) = R_{xx}(t_2 - t_1)$$

## Was ist eigentlich Information?

- Datenmenge:

- $n$  verschiedene Zeichen  $z$ :  $i(z) = \log_2 n$  (Bits pro Zeichen)
- Gleichverteilung:  $p(z) = \frac{1}{n} \Rightarrow i(z) = -\log_2 p(z)$
- Allgemeine Verteilung:  $i(z) = -\log_2 p(z)$
- C. E. Shannon: “Eigeninformation”
- Einheit:
  - \* bestimmt durch Basis des Logarithmus
  - \* z.B. Anzahl Bits, Zeichen, Wörter, Seiten, etc.

- Informationsgehalt:

- Bezug zu Datenmenge?
- Intuitiv: minimal mögliche Datenmenge ohne Verluste
- Vorsicht: In diesem Sinne enthält eine zufällige Zeichenfolge mehr Information als z.B. eine Seminararbeit gleicher Länge!

## Was ist eigentlich Information?

- Datenmenge:

- $n$  verschiedene Zeichen  $z$ :  $i(z) = \log_2 n$  (Bits pro Zeichen)
- Gleichverteilung:  $p(z) = \frac{1}{n} \Rightarrow i(z) = -\log_2 p(z)$
- Allgemeine Verteilung:  $i(z) = -\log_2 p(z)$
- C. E. Shannon: “Eigeninformation”
- Einheit:
  - \* bestimmt durch Basis des Logarithmus
  - \* z.B. Anzahl Bits, Zeichen, Wörter, Seiten, etc.

- Informationsgehalt:

- Bezug zu Datenmenge?
- Intuitiv: minimal mögliche Datenmenge ohne Verluste
- Vorsicht: In diesem Sinne enthält eine zufällige Zeichenfolge mehr Information als z.B. eine Seminararbeit gleicher Länge!  
... d.h.: **Quantität ist nicht gleich Qualität!**

## Information von Ereignissen

Ereignisse  $A$  und  $B$  seien **unabhängig**

- dann gilt  $p(A, B) = p(A) \cdot p(B)$
- Information des Verbundereignisses  $A \cup B$ :  $i(A, B) = i(A) + i(B)$
- kein Informationsgewinn durch Gruppierung
- Beispiele:
  - Münzwurf, gleichverteilt:  $p(Kopf) = p(Zahl) = 1/2$   
 $\Rightarrow i(Kopf) = i(Zahl) = 1 \text{ Bit.}$
  - Münzwurf, nicht gleichverteilt:  $p(Kopf) = 7/8, \quad p(Zahl) = 1/8$   
 $\Rightarrow i(Kopf) = 0.193 \text{ Bits,} \quad i(Zahl) = 3 \text{ Bits.}$

## Information von Ereignissen

Ereignisse  $A$  und  $B$  seien **abhängig**

- dann gilt  $p(A, B) = p(A|B) \cdot p(B)$
- Information des Verbundereignisses  $A \cup B$ :  $i(A, B) = i(A|B) + i(B)$
- Informationsgewinn durch Gruppierung möglich, z.B.:
  - Betrachte Ziffernfolge:  $f = 12123333123333123312$
  - Gleiche Kodewortlänge für alle Symbole:  $20 \cdot 2 \text{ Bits} = 40 \text{ Bits}$
  - Annahme unabhängiger Einzelsymbole:  
 $p(1) = p(2) = 1/4$  und  $p(3) = 1/2 \Rightarrow i(f) = 5 \cdot 2 + 5 \cdot 2 + 10 \cdot 1 \text{ Bits} = 30 \text{ Bits}$
  - Abhängigkeit durch Gruppierung zu Blöcken 12 und 33:  
 $p(12) = p(33) = 1/2 \Rightarrow i(f) = 5 \cdot 1 + 5 \cdot 1 \text{ Bits} = 10 \text{ Bits}$

### Mittlere Information:

- betrachte Zufallsprozess  $\mathcal{Z}$ , mögliche Ereignisse:  $A_i$
- Ereignis  $A_i$  tritt ein mit Wahrscheinlichkeit  $p(A_i)$
- mittlere Information eines Ereignisses dieses Zufallsprozesses:  
Erwartungswert des Informationsgehalts

$$\begin{aligned} H(\mathcal{Z}) = E\{i(A)\} &= \sum_i p(A_i) \cdot i(A_i) \\ &= - \sum_i p(A_i) \cdot \log_2 p(A_i) \end{aligned}$$

**C. E. Shannon: Entropie  $H$  gibt minimale Anzahl von Bits zur verlustlosen Kodierung des Zufallsprozesses an**

- Qualität einer Kompressionsmethode: Vergleich mit Entropie
- Vorsicht: Entropie abhängig vom Modell (bzgl. Abhängigkeit)!

### Mittlere Information im allgemeinen Fall:

- betrachte stochastischen Prozess  $\mathcal{S}$ , der Folge von Ereignissen  $A_i$  erzeugt
- Ereignisse seien aus Alphabet  $\{A_1, \dots, A_m\}$
- Entropie:

$$H(\mathcal{S}) = - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i_1=1}^m \sum_{i_2=1}^m \cdots \sum_{i_n=1}^m p(A_{i_1}, \dots, A_{i_n}) \cdot \log_2 p(A_{i_1}, \dots, A_{i_n})$$

- Reichweite von Korrelationen/Redundanzen unbekannt:  
Betrachtung im Limes unendlich langer Folgen
- Verteilung bzw. Strukturierung der Daten im Allgemeinen nicht (exakt) bekannt
- Notwendigkeit der Modellierung

## Herleitung der Entropie

- Informationstheoretische Basis: C. E. Shannon
- Herleitung der mittleren Information allein über Axiome
- Betrachte unabhängige Ereignisse  $A_i$  mit Wahrscheinlichkeiten  $p_i = p(A_i)$
- Axiome:
  1. Mittlere Information  $H$  ist stetige Funktion der Wahrscheinlichkeiten  $p_i$ ; kleine Änderungen in den Wahrscheinlichkeiten führen zu kleinen Änderungen in der mittleren Information.
  2. Für gleichverteilte Ereignisse mit  $p_i = 1/n$  ist mittlere Information eine monotone Funktion von  $n$ , der Anzahl der möglichen Ereignisse.
  3. Konsistenz der mittleren Information unter Gruppierung. Betrachte  $A_2 \vee A_3$  als neues Ereignis:

$$H(p_1, p_2, p_3) = H(p_1, p_2 + p_3) + p_1 \cdot H\left(\frac{p_1}{p_1} = 1\right) + (p_2 + p_3) \cdot H\left(\frac{p_2}{p_2 + p_3}, \frac{p_3}{p_2 + p_3}\right)$$

## Modellierung:

- **Physikalisch**
  - Wissen über die Strukturierung der Quelle
  - Vorhersage von Werten mittels Modell
  - Kodierung des Residuums: Abweichung vom Modell
- **Statistisch**
  - Steuerung von Kodewortlänge, Gruppierung, etc. anhand der Wahrscheinlichkeiten
  - Beispiele:

- \* **Unabhängigkeit:**

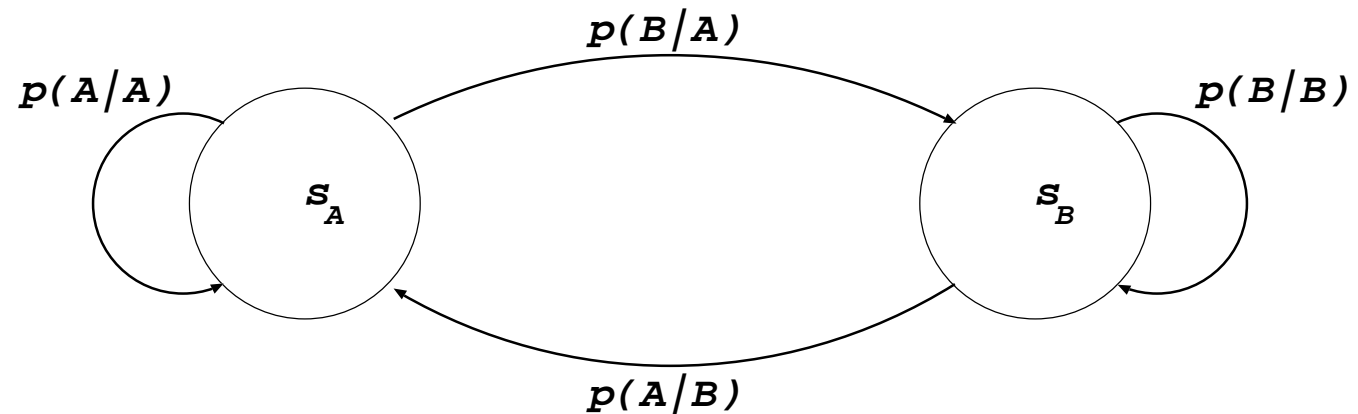
$$p(A_1, \dots, A_n) = \prod_{i=1}^n p(A_i)$$

- \* **Markov Annahme: Abhängigkeit endlicher Reichweite  $m$ ,**

$$\begin{aligned} p(A_1, \dots, A_n) &= \prod_{i=1}^n p(A_i | A_1, \dots, A_{i-1}) \\ &= \prod_{i=1}^n p(A_i | A_{i-m}, \dots, A_{i-1}) \end{aligned}$$

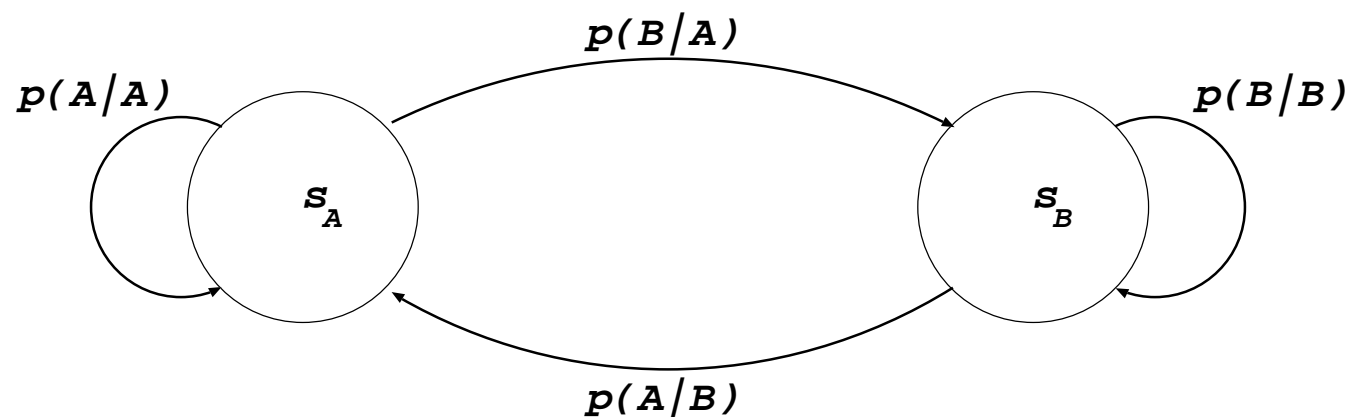
## Markov-Prozesse:

- Einfachster nicht-trivialer Fall:  
Abhängigkeit allein vom direkt vorhergehenden Ereignis
- $p(A_i|A_1, \dots, A_{i-1}) = p(A_i|A_{i-1})$
- Vgl. stochastischen endlichen Automaten, z.B.:



## Markov-Prozesse:

- Vgl. stochastischen endlichen Automaten, z.B.:



- Binärer Zufallsprozess, Ereignisse  $X \in \{A, B\}$
  - Zustände des Automaten:  $s_A, s_B$
  - Zustand  $s_X$  “emittiert” Ereignis  $X$
  - Übergangswahrscheinlichkeiten:  $p(X_i|X_{i-1})$
- Bezüge: Sprachmodell in der Spracherkennung, Hidden Markov Modelle

## Kodierung

- Zuweisung binärer Folgen zu Elementen eines Alphabets
- Kode: Menge der binärer Folgen
- Zeichen: Element eines Alphabets
- Kodewörter: Elemente eines Kodes
- Problem: Welche Kodewörter bzw. Kodewortlängen sind den Elementen des Alphabets zuzuordnen, um eine möglichst hohe Kompressionsrate auf den zu erwartenden Datensätzen zu erreichen?

## Eindeutige Dekodierbarkeit: Beispiele

Zeichen	Wahrscheinlichkeit	Kode 1	Kode 2	Kode 3	Kode 4
$a_1$	0.5	0	0	0	0
$a_2$	0.25	0	1	10	01
$a_3$	0.125	1	00	110	011
$a_4$	0.125	10	11	111	0111
mittlere Länge		1.125	1.25	1.75	1.875

- mittlere Länge:  $\sum_i p(a_i)n(a_i)$ , mit Kodewortlänge  $n(a_i)$
- Entropie: 1.75
- Kode 1: Identische Kodierung für  $a_1$  und  $a_2$ : Kode 1 ist nicht eindeutig!
- Kode 2: Dekodierung von 100 liefert  $a_2a_3$  oder  $a_2a_1a_1$ : auch Kode 2 ist nicht eindeutig!
- Notwendig: Eindeutige Dekodierbarkeit
- Kode 3: Präfix-Kode – Ende des Kodeworts direkt erkennbar!
- Kode 4: ähnlich Kode 3, Kodewort-Ende aber erst zu Beginn des Folge-Kodeworts erkennbar!

## Eindeutige Dekodierbarkeit: Beispiele (2)

Zeichen	Wahrscheinlichkeit	Kode 5	Kode 6
$a_1$	0.5	0	0
$a_2$	0.25	01	01
$a_3$	0.125	11	10

- **Kode 5: Dekodierung erst am Ende eindeutig**
  - z.B.: Dekodiere 01111111111111111111
  - Beginn mit  $a_1$  mit 8 folgenden  $a_3$ : “baumelndes” Bit am Ende – nicht möglich!
  - Korrekt:  $a_2$  gefolgt von 8  $a_3$
- **Kode 6: Dekodierung von 010 liefert  $a_1a_3$  oder  $a_2a_1$ : nicht eindeutig!**

## Präfix-Kodes

- Definition: Kein Kodewort darf Präfix eines anderen Kodeworts sein.
- Binärbaum-Darstellung:
  - Verzweigung: rechts entspricht 1, links 0
  - mögliche Kodewörter: Knoten
  - Präfix-Kode: Kodewörter nur an Blättern (Endknoten)
- Kraft-McMillan Ungleichung: 

Für jeden eindeutig dekodierbaren Code gibt es einen entsprechenden Präfix-Kode mit gleichen Kodewortlängen.
--

## Zusammenfassung

- Grundlagen**
- Motivation
  - Anwendungen
  - Beispiele

- Kompressionskonzepte**
- Kompressionsmethoden
  - Unterscheidung verlustlos/verlustbehaftet
  - Statistische Betrachtungsweise, Grundkonzepte
  - Bewertungsmöglichkeiten

- Informationstheorie**
- Grundkonzepte, Shannon
  - Kodierung