

Vergleich verlustfreier Datenkompressionsverfahren auf Bilddaten

Nick Schreiber

Technische Hochschule Rosenheim

Master Informatik, Seminar theoretische Informatik

Email: nick.schreiber@stud.th-rosenheim.de

Abstract—This document is a model and instructions for L^AT_EX. This and the IEEEtran.cls file define the components of your paper [title, text, heads, etc.]. *CRITICAL: Do Not Use Symbols, Special Characters, Footnotes, or Math in Paper Title or Abstract.

I. EINLEITUNG

Datenkompression beschreibt ein Verfahren, das zum Ziel hat, eine Nachricht ohne relevanten Informationsverlust zu verkleinern. Als Nachricht ist jede Art von digitalen Daten gemeint, z.B. Text, Bild, Audio, etc.. Daten können komprimiert werden, indem Redundanz entfernt oder eine Kodierung angewendet wird. Daher wird Datenkompression oft als Kodierung bezeichnet. Kodierung ist ein allgemeiner Begriff, der jede spezielle Darstellung von Daten nach einem bestimmten Schema umfasst. [1]

Es gibt zwei Arten der Datenkompression: die verlustbehaftete und die verlustfreie Kompression. Bei der verlustbehafteten Datenkompression kann eine bestimmte Menge an Information durch die Kompression verloren gehen, was in Kauf genommen wird, da dadurch die Datenmenge erheblich reduziert werden kann oder weil die verlorene Informationen für die Anwendung kaum relevant sind. Das wird auch als Irrelevanzreduktion bezeichnet [2, S. 5]. Ein Beispiel für Irrelevanzreduktion kann bei Audiosignalen beobachtet werden. Der menschliche Hörfrequenzbereich liegt zwischen 20 Hz und 20 kHz [3]. Daher ist es nicht sinnvoll, Frequenzen, die weit außerhalb des hörbaren Bereichs liegen, in Audiodateien zu speichern. Bei der verlustfreien Datenkompression wird die Integrität der Daten bewahrt. Das bedeutet, dass sämtliche Informationen in den komprimierten Daten enthalten sind und die Originaldaten vollständig rekonstruierbar sind. In dieser Arbeit wird nur die verlustfreie Datenkompression untersucht, da Irrelevanzreduktion nicht direkt zum Themegebiet der Datenkompression gehört.

Die Datenkompression von Bildern wird aus verschiedenen Gründen eingesetzt. Speichernutzung: Unkomprimierte Bilddaten können beträchtlich mehr Speicherplatz beanspruchen. Übertragungseffizienz: Bei der Übertragung von Bildern über Netzwerke oder das Internet spielt die Übertragungseffizienz eine entscheidende Rolle. Wenn ein Bild über einen Kanal mit begrenzter Bandbreite gesendet wird, kann es effizienter sein, das Bild zu komprimieren, es zu übertragen und dann beim Empfänger zu dekomprimieren. Dadurch wird die

Übertragungszeit verkürzt und das Bild kann schneller bereitgestellt werden. Dies führt zu einer höheren Übertragungsrate und einer reduzierten Bandbreitennutzung.

II. ZIELSETZUNG DER ARBEIT

Ziel der Arbeit ist es zu untersuchen, ob und warum bestimmte verlustfreie Datenkompressionsverfahren für Bilddaten besser geeignet sind als andere. Dazu werden die theoretischen Aspekte der Kompressionsalgorithmen untersucht. Außerdem wird untersucht, wie Bilddaten aufgebaut sind und welche Besonderheiten in den Bilddaten für die Datenkompression genutzt werden können. Die Arbeit hat einen praktischen Anteil. Verschiedene Algorithmen zur verlustfreien Datenkompression wurden manuell implementiert und an unterschiedlichen Bilddaten getestet. So konnten konkrete Ergebnisse über die Leistungsfähigkeit der Algorithmen gewonnen werden. Die verglichenen Algorithmen sind Run Length Encoding (RLE), Huffman Encoding, Lempel-Ziv 1977 (LZ77), PNG Algorithmus und verschiedene Kombinationen der Algorithmen. Die Ergebnisse werden interpretiert und mit den theoretischen Erwartungswerten verglichen.

III. GRUNDLAGEN ZUR DATENKOMPRESSION

In der Informatik gehört die Datenkompression zum Teilgebiet der Informationstheorie. Um zu verstehen, wie verlustfreie Datenkompression funktioniert, muss man einige theoretische Grundlagen kennen.

A. Information

Claude Shannon, der Erfinder der Informationstheorie, definiert den Begriff Information als Maß für den Informationsgehalt. Information ist ein Maß der Unsicherheit, das durch das Eintreten eines bestimmten Ereignisses oder das Empfangen einer Nachricht verringert wird. [4] Information ist die Mindestanzahl von Bits, die zur Codierung einer Nachricht verwendet werden müssen. [5] Die grundlegende Idee zu Information besteht darin, dass Informationen umso wertvoller sind, je unerwarteter oder unwahrscheinlicher sie sind.

B. Entropie

Die Quantifizierung des Informationsgehalts erfolgt durch die Entropie (H). Formal drückt die Entropie die durchschnittliche Menge an Bits aus, die benötigt werden, um eine Information zu kodieren. [4] Die Entropie berücksichtigt

die Wahrscheinlichkeiten verschiedener möglicher Ereignisse und erreicht ein Maximum, wenn alle Ereignisse gleich wahrscheinlich sind, was auf maximale Unsicherheit hinweist.

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \cdot \log_2(P(x_i)) \quad (1)$$

Formel 1 definiert die Entropie mathematisch. Hierbei steht $H(X)$ für die Entropie der Menge X . $P(x_i)$ steht für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens des Ereignisses x_i . Die Summe wird über alle möglichen Ereignisse x_i in X gebildet.

Diese Formel beschreibt die durchschnittliche Menge an Bits, die benötigt werden, um eine Nachricht aus X zu kodieren. Wenn die Entropie hoch ist, ist die Unsicherheit groß, und es werden mehr Bits benötigt, um die Informationen zu repräsentieren. Wenn die Entropie niedrig ist, gibt es weniger Unsicherheit, und somit werden weniger Bits benötigt.

Man kann nun eine direkte Verbindung zwischen Entropie und Kompression herzustellen. Niedrige Entropie bedeutet, dass eine Datenmenge strukturiert ist, bzw. Muster aufweist. Das heißt, dass in den Daten wenig Unsicherheit ist und die Daten Redundanz enthalten. Das bedeutet, niedrige Entropie sagt, dass die Daten komprimiert werden können.

C. Redundanz und Mutual Information

Redundanz beschreibt Informationen die in Daten mehrfach vorhanden sind. [6] Einfach gesagt kann man Redundanz als überflüssige Information betrachten. Eine hohe Redundanz sagt aus, dass sich wiederholende oder vorhersehbare Muster innerhalb der Daten befinden.

Um eine Formel für die Redundanz aufzustellen benötigt man die mittlere Codewortlänge. Die mittlere Codewortlänge gibt den durchschnittlichen Bedarf an Bits pro Symbol in einer Nachricht an. Sei X ein Alphabet und $x \in X$. $C(x)$ bezeichnet das zu x gehörende Codewort. $l(x)$ bezeichnet die Länge von $C(x)$. Die mittlere Codewortlänge $L(C)$ einer Nachricht $C(x)$ mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung $p(x)$ ist in Formel 2 definiert.

$$L(C) = \sum_i^{|X|} p(x_i) \cdot l(x_i) \quad (2)$$

Mit der mittleren Codewortlänge lässt sich nun die Redundanz des Codes, bzw. der Nachricht berechnen. Die Formel 3 definiert die Redundanz einer Nachricht.

$$R_{\text{Code}} = L(C) - H(X) \quad (3)$$

Die Redundanz wird berechnet, indem von der tatsächlichen durchschnittlichen Anzahl an Bits pro Symbol die theoretisch minimale Anzahl an Bits pro Symbol abgezogen werden. Die theoretisch minimale Anzahl an Bits pro Symbol entspricht der enthaltenen Information und ist gleich der Entropie der Nachricht. Daraus ergibt sich, dass die Redundanz ≥ 0 sein muss.

Mutual Information ist ein quantitatives Maß für die gegenseitige Abhängigkeit von zwei Variablen. [4] Es misst, wie sehr die Kenntnis einer Variablen die Unsicherheit über die andere Variable reduziert. Dieses Konzept ist entscheidend, um die Struktur von Daten zu verstehen und voneinander abhängige Informationen zu erkennen.

Wenn die Mutual Information zwischen zwei Variablen hoch ist, bedeutet dies, dass das Wissen über eine Variable bedeutende Informationen über die andere Variable liefert. Hohe Mutual Information sagt dementsprechend aus, dass zwei Variablen stark voneinander Abhängig sind. Das Wissen über den Wert einer Variable trägt bereits wesentlich zur Vorhersage oder zum Verständnis der anderen Variable bei.

Geringe Mutual Information sagt aus, dass die beiden Variablen weniger gemeinsame Information teilen. Das Wissen über den Wert einer Variable trägt nicht so stark zur Vorhersage oder zum Verständnis der anderen Variable bei. Das bedeutet eine schwächere Statistische Abhängigkeit der Variablen.

Durch das Erkennen von Mutual Information kann gezeigt werden, dass Muster und/ oder Wiederholungen und dementsprechend Redundanz in den Daten enthalten ist. Redundanz spielt im Bezug auf Kompression eine wichtige Rolle. Kompression funktioniert durch das identifizieren und eliminieren redundanter Elemente, um den Informationsgehalt zu maximieren und die Effizienz von Datenrepräsentationen zu steigern.

IV. INFORMATIONSTHEORIE

Eine wichtige Punkt in der Informationstheorie ist die Unterscheidung zwischen Daten und Information. Daten und Information werden im normalen Sprachgebrauch häufig als Synonym verwendet, was eigentlich nicht korrekt ist.

Daten sind rohe Fakten oder Symbole, die an sich keine spezifische Bedeutung haben. Informationen entstehen durch die Interpretation, Organisation und Strukturierung von Daten, wodurch ein sinnvoller Kontext geschaffen wird. [7] Daten werden zu Informationen, wenn sie für einen bestimmten Zweck verwendet werden können.

Im Kontext der Datenkompression ist es wichtig zu verstehen, dass nicht alle Daten gleichermaßen informativ sind. Ein effektiver Kompressionsalgorithmus entfernt redundante und nicht informative Teile der Daten. Jedoch bleibt die gesamte Information erhalten. Die Daten sind somit informativer und komprimierter als zuvor.

A. Quellencodierungstheorem/ Source Coding Theorem

Das Quellencodierungstheorem beschäftigt sich mit der Effizienz der Datenkompression und sagt aus, dass es eine Grenze für die minimale mittlere Codierungslänge gibt, die für die Darstellung von Information aus einer bestimmten Quelle erforderlich ist. [8] Das Quellencodierungstheorem besagt, dass die mittlere Codierungslänge L pro Symbol für eine gegebene Quelle nicht kleiner sein kann als die Entropie H der Quelle. Mathematisch in Formel 4 ausgedrückt.

$$L \geq H \quad (4)$$

Die Entropie stellt dabei die untere Schranke für die mittlere Codierungslänge dar. Das zeigt, dass Datenkompression nicht bis ins unendliche möglich ist ohne Information zu verlieren. Die Maximale Kompression ist genau dann erreicht, wenn $L = H$ entspricht. Es würde also bei solchen Daten keinen Sinn machen zu versuchen die Daten zu komprimieren, da das ohne Informationsverlust nicht möglich ist.

Vlt. Todo: Schubfachprinzip, Bedeutung von Entropie in diesem Kontext.

B. Kolmogorov Komplexität

Die Kolmogorov Komplexität ist ein Maß für die Strukturiertheit einer Zeichenkette. Sie entspricht der Länge des kürzesten Programms, das die Zeichenkette erzeugen kann. [9] Die Kolmogorov Komplexität ist dementsprechend ein Maß für die algorithmische Komplexität von Informationen.

Die Kolmogorov Komplexität eines Objekts, z. B. eines Textes, ist die Länge des kürzesten Programms, das das Objekt als Ausgabe erzeugt. Hier ein Beispiel für so ein Programm. Betrachten wir die folgende Zeichenkette: "AAAAAAAAABBBBBCCCCC". Die Zeichenkette besteht aus 20 Zeichen (9 x A, 5 x B, 6 x C). Mit einem einfachen Programm lässt sich die Zeichenkette deutlich kürzer beschreiben: "9A5B6C". Das Programm gibt die Länge der identischen aufeinanderfolgenden Zeichen an, gefolgt von dem Zeichen. So lässt sich die ursprüngliche Zeichenkette der Länge 20 in nur 6 Zeichen darstellen. Wir haben ein Programm gefunden, das die Länge der Beschreibung der Zeichenkette erheblich reduziert. Die Kolmogorov Komplexität dieser Zeichenkette ist deutlich geringer als die ursprüngliche Länge der Zeichenkette. Das zeigt, dass in der Zeichenkette Strukturen vorhanden sind.

Es ist wichtig zu beachten, dass die tatsächliche Kolmogorov Komplexität für allgemeine Zeichenketten wegen des Halteproblems nicht praktisch berechenbar ist. [10] Allerdings können Abschätzungen gemacht werden. Wenn ein Algorithmus gefunden wird, der eine Zeichenkette in einem kürzeren Programm darstellt entspricht die Kolmogorov Komplexität der Zeichenkette maximal der Länge des Programms. Es ermöglicht den Informationsgehalt von Daten in Bezug auf die kürzeste mögliche algorithmische Beschreibung zu verstehen.

C. Datenanforderungen, Komprimierbarkeit

Daten können in verschiedene Gruppen eingeteilt werden. Auf der einen Seite stehen strukturierte Daten und auf der anderen Seite unstrukturierte Daten.

Strukturierte Daten sind Daten in denen wiederkehrende oder vorhersagbare Muster enthalten sind. Die Entropie der Daten ist niedrig. Ein Beispiel für strukturierte Daten sind Tabellen.

Unstrukturierte Daten sind Daten, in denen keine wiederkehrende oder vorhersagbare Muster enthalten sind. Die Entropie der Daten ist hoch. Ein Beispiel für unstrukturierte Daten sind zufällig erzeugte Daten.

Strukturierte Daten enthalten meist eine höhere Redundanz als unstrukturierte Daten. Das ist dem Fakt geschuldet, dass

die maximal mögliche Kompression, der Information in den Daten, der Entropie, entspricht. Daten können theoretisch maximal auf das Niveau der Entropie der Daten komprimiert werden. Strukturierte Daten mit geringer Entropie haben ein tieferes Limit als unstrukturierte Daten. Deshalb können strukturierte Daten meist mehr komprimiert werden als unstrukturierte.

1) *Vorverarbeitung*: Eine Möglichkeit aus etwas unstrukturierten Daten strukturierte zu machen ist über eine Vorverarbeitung der Daten. So eine Vorverarbeitung ist meist eine Normalisierung oder eine Datenfilterung. Wichtig ist, dass der Vorverarbeitungsschritt umkehrbar ist. Eine Art wie Daten für die Kompression Vorverarbeitet werden, wird im Lauf der Arbeit anhand des PNG Algorithmus gezeigt. PNG verwendet eine Datenfilterung.

2) *Limitationen*: Ein Beispiel für maximal unstrukturierte Daten die scheinbar nicht komprimierbar sind, sind normalverteilte Zufallszahlen. "The Random Compression Challenge" von Mark Nelson [11] betrachtet genau dieses Problem. Das Ziel der Challenge ist es eine Datei, die etwa ein halbes Megabyte groß ist zu komprimieren. Die Datei besteht aus einer Millionen Zufallszahlen, die gleichverteilt sind und aus dem Buch "A Million Random Digits with 100,000 Normal Deviates" [12] kommen.

Es gibt zwei Arten wie die Challenge gewonnen werden kann. Die eine Möglichkeit ist es, die Kolmogorov Komplexität zu verwenden und ein Programm zu schreiben, dass die ursprüngliche Datei erzeugt. Die Größe des Programms muss kleiner sein, als die zu komprimierende Datei. Es geht dabei darum zu zeigen, dass die Kolmogorov Komplexität kleiner ist als die Größe der Datei selbst.

Die andere Möglichkeit ist es, ein System zu entwickeln, dass Dateien mit normalverteilten Zufallszahlen komprimieren und vollständig wieder aus der komprimierten Datei dekomprimieren kann. Die Größe des Systems spielt dabei keine Rolle, weil das System mehr als nur eine Datei erfolgreich komprimieren und dekomprimieren muss. Es ist bewiesen, dass dieser Ansatz unmöglich ist [11]. Der Grund dafür ist, dass die Entropie der Größe der Datei selbst entspricht und ohne Informationsverlust nicht verkleinert werden kann.

Bis heute hat noch niemand die Challenge gewonnen. Das ist nicht verwunderlich, da die zweite Möglichkeit zu gewinnen bewiesenermaßen unmöglich ist. Hingegen ist die erste Möglichkeit mit dem Kolmogorov Komplexität nur vermutlich unmöglich. Das bedeutet es könnte eine Lösung geben, ist aber nach jetzigem Stand unwahrscheinlich.

Die Challenge ist ein perfektes Beispiel dafür, wieso es Sinn macht die Daten zu kennen die man komprimieren will. Sie zeigt die Limitationen der Datenkompression auf.

V. AUFBAU UND STRUKTUR VON BILDDATEN

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der dem Aufbau und der Struktur von Bilddaten. Es gibt verschiedene Möglichkeiten Bilddaten zu speichern und darzustellen. In dieser Arbeit werden die Bilder in Form einer Rastergrafik/Bitmap gespeichert, dem RGB Format. Eine Rastergrafik ist

eine pixelbasierte Darstellung eines Bildes. Die Auflösung eines Bildes gibt an, wie viele Pixel in der Breite und Höhe vorhanden sind. Ein Pixel ist die kleinste diskrete Einheit in einem digitalen Bild.

Das RGB Format ist eine Möglichkeit, Farbinformationen in digitalen Bildern zu repräsentieren und zu speichern. RGB steht für die Farben Rot (R), Grün (G) und Blau (B). Es ist ein additives Farbmodell und jede Farbe wird durch eine Kombination der drei Grundfarben erzeugt, auch weiß und schwarz. [13]

Ein Beispielbild mit einer Auflösung von 800 Pixel Breite und 800 Pixel Höhe wird in dem RGB Format durch eine Matrix gespeichert. Die zugehörige Matrix hat eine Größe von (800, 800, 3), (Breite, Höhe, Farbkanäle). Die dritte Dimension ist die Anzahl der Farbkanäle. Für jeden Pixel werden drei Werte, die die Farbe des Pixels beschreiben, gespeichert. Der erste Wert ist der Rotanteil, der zweite der Grünanteil und der dritte den Blauanteil. Das RGB Format verwendet normalerweise 8 Bit pro Farbkanal, was eine Farbtiefe von 24 Bit pro Pixel ergibt. Jeder Farbwert eines Pixels hat 8 Bit, bzw. 1 Byte Speicher zur Verfügung und kann Werte zwischen 0 und 255 annehmen.

Bilder im RGB Format sind nach einem bestimmten Schema aufgebaut, weshalb Strukturen in den Bilddaten entstehen. Diese Strukturen können bei der Datenkompression helfen die Bilder zu komprimieren. Eine Struktur im RGB Format ist die Darstellung von Nichtfarben wie schwarz und weiß. Um schwarz, bzw. weiß darzustellen muss ein Pixel für alle drei Farbkanälwerte entweder den Wert 0 oder 255 annehmen. Um reine Farben darzustellen wie rot, wird nur ein Pixelwert für den Rotanteil benötigt, während der Grün- und Blauanteil auf Null gesetzt ist. Ebenso gibt es viele Farbmischungen bei denen eine der Grundfarben nicht benötigt wird und somit deren Anteil im Pixel auf 0 gesetzt wird. Diese Strukturen entstehen durch das Speichern des Bildes im RGB Format. Eine weitere Struktur, die in den meisten Bildern vorhanden ist, ist, dass benachbarte Pixel meist ähnliche oder die gleiche Farbe besitzen. Das hat damit zu tun, dass es in Bildern meistens Regionen gibt, die zu einem Objekt oder Bildteil gehören, die eine homogene Farbe besitzen.

Diese Strukturen und Wiederholungen in Bilddaten können ausgenutzt werden um die Daten zu komprimieren. Bei der Datenkompression ist es entscheidend, welche Algorithmen diese in Bildern spezifisch enthaltenen Redundanzen erkennen und ausnutzen kann.

VI. MESSBARKEIT DER KOMPRESSIONSALGORITHMEN

Es ist wichtig, Kriterien festzulegen, anhand derer die Algorithmen bewertet werden können. Eine Messbarkeit ist notwendig, um Datenkompressionsalgorithmen und deren Ergebnisse vergleichen zu können und um zu entscheiden, was ein guter Kompressionsalgorithmus ist.

Ein Kompressionsalgorithmus funktioniert nach verschiedenen Schritten. Schritt 1 ist die Vorverarbeitung der zu komprimierenden Daten. Dieser Schritt ist Optional und transformiert die ursprünglichen Daten. Schritt 2 ist die Kom-

pression der Daten. In diesem Schritt wird der für die Kompression spezifische Algorithmus angewendet, um die Daten zu komprimieren. Heraus kommen komprimierte Daten und optional je nach Algorithmus spezifische Zusatzinformationen. Schritt 3 ist die Dekompression der komprimierten Daten. Dabei wird die Kompression rückgängig gemacht. Schritt 4 ist das Rückgangigmachen des Vorverarbeitungsschritt, falls verwendet. Die Daten, die den Zyklus durchlaufen, sind mit den Originaldaten identisch, da es sich um verlustfreie Kompressionsalgorithmen handelt.

Um die Qualität eines Kompressionsalgorithmus konkret bewerten zu können, werden die folgenden drei Kriterien festgelegt, anhand derer die Bewertung vorgenommen wird.

A. Kompressionsrate

Ein Punkt um zu entscheiden wie gut ein Datenkompressionsverfahren funktioniert ist die Datengröße der komprimierten Daten (nach Schritt 2, inklusive Zusatzinformationen falls vorhanden) zu betrachten. Die Datengröße kann in der Maßeinheit Bit, bzw. Byte, bestimmt werden und gibt an, wie viel Speicherplatz Daten benötigen. Ein Maß um zu messen, wie stark die Daten im Verhältnis zu den Originaldaten mit dem jeweiligen Algorithmus komprimierbar sind, ist die Kompressionsrate.

Die Kompressionsrate wird aus dem Verhältnis zwischen der Größe der ursprünglichen, nicht komprimierten, Daten und der Größe der komprimierten Daten bestimmt. Sie wird in Prozent angegeben und ist in Formel 5 angegeben.

$$\text{Kompressionsrate} = \left(1 - \frac{\text{Größe komp. Daten}}{\text{Größe unkomp. Daten}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

Je höher die Kompressionsrate, desto stärker hat der Algorithmus die Daten komprimiert. Eine Kompressionsrate von 100 % ist nicht erreichbar, außer die Originaldaten enthalten keine Information, bzw. sind leer. Ein Wert von 0 % bedeutet, dass keine Kompression stattgefunden hat und die komprimierten Daten genauso groß sind wie die ursprünglichen. Ein negativer Wert ist möglich und zeigt, dass die komprimierten Daten mehr Speicherplatz benötigen als die ursprünglichen Daten. Das bedeutet, dass der Algorithmus die ursprünglichen Daten nicht erfolgreich komprimieren kann. Die Kompressionsrate kann Werte annehmen im Bereich $(-\infty, 100]$.

Die Bewertung mit der Kompressionsrate ist datenabhängig und wird konkret ermittelt. Das Bedeutet die zu komprimierenden Daten sind entscheidend.

B. Kompressionszeit

Ein weiterer Punkt um Datenkompressionsalgorithmen zu bewerten, ist die Kompressionszeit. Die Kompressionszeit gibt an, wie lange ein Algorithmus benötigt um komprimierte Daten aus den ursprünglichen Daten zu erzeugen. Sie misst die kombinierte Zeit für die Vorverarbeitung (Schritt 1) und die anwendung des Kompressionsalgorithmus (Schritt 2). Die Kompressionszeit wird in Sekunden, bzw. Millisekunden, gemessen.

Eine Messung erfolgt immer genau an einem Input, der komprimiert wird. Es werden also konkrete Werte gemessen. Durch das Messen und den Vergleichen verschiedengroßer Eingangsdaten können konkrete Aussagen über die Kompressionszeit abhängig von der Größe der Eingangsdaten getroffen werden.

Die konkreten Ergebnisse der Kompressionszeit können mit der theoretisch erwarteten Laufzeit der Algorithmen verglichen werden. Die theoretische Laufzeit eines Algorithmus wird in Form der O-Notation angegeben. Die O-Notation beschreibt die Obergrenze des Wachstumsverhaltens der Laufzeit eines Algorithmus in Bezug auf einen wachsenden Input. [14] Mit den praktischen Messungen und der theoretischen Vorhersage können Erkenntnisse über die implementierten Algorithmen getroffen werden.

C. Dekompressionszeit

Die Dekompressionszeit ein weiteres Maß um Datenkompressionsalgorithmen zu bewerten. Sie gibt an, wie lange ein Algorithmus benötigt um die ursprünglichen Daten aus den komprimierten Daten zu erzeugen. Sie misst die kombinierte Zeit für die Dekompression (Schritt 3) und das Rückgangigmachen der Vorverarbeitung (Schritt 4). Die Dekompressionszeit wird in Sekunden, bzw. Millisekunden, gemessen. Die Messungen erfolgen ebenso wie bei der Kompressionszeit an konkreten Daten.

D. Abwiegen der Messkriterien

Nach der definition der drei Messkriterien anhand derer die Kompressionsalgorithmen verglichen werden, können diese zudem gewichtet werden. Je nach Anwendungsfall sind die Messkriterien unterschiedlich wichtig. In den folgenden Abschnitten werden drei Beispiele für unterschiedliche Anwendungen und Gewichtungen der Kriterien dargestellt.

Beispiel 1, Echtzeitanwendungen: Beim Senden von Daten über ein bandbreitenbegrenztes Netz macht es für Echtzeitanwendungen Sinn die Daten vor dem Senden zu komprimieren. Dadurch wird nur eine geringere Bandbreite benötigt und die Übertragung der Daten funktioniert schneller. Auf der Empfängerseite müssen die Daten möglichst schnell dekomprimiert werden. Für diesen Anwendungsfall ist die Kompressions- und Dekompressionszeit entscheidend. Die Kompressionsrate spielt eine hintergeordnete Rolle.

Beispiel 2, Ressourcen im Internet: Bei einer Webseite die Ressourcen wie Bilder anzeigen soll ist es wichtig, dem Besucher der Webseite die Ressourcen möglichst schnell bereitzustellen. Da das Internet ein bandbreitenbegrenztes Netz ist, macht es Sinn Ressourcen komprimiert zu senden und beim Besucher zu dekomprimieren. Für diesen Anwendungsfall ist die Kompressionszeit egal, da die Ressourcen bereits in vorkomprimierter Form vorliegen können. Entscheidend ist hier die Dekompressionszeit und zweitrangig die Kompressionsrate.

Beispiel 3, Archivierung: Archivierung ist das langfristige Speichern von Daten. Auf die Daten wird nur selten zugegriffen. Entscheidend ist, dass die Daten möglichst wenig Speicherplatz benötigen, um möglichst viel speichern zu können.

Für diesen Anwendungsfall ist das Messkriterium Kompressionsrate wichtig. Kompressions- und Dekompressionszeit der Daten spielt wegen der seltenen und nicht dringenden Datenzugriffe keine Rolle.

Aus den Beispielen ist zu erkennen, dass es Sinn hat die Datenkompressionsalgorithmen nach den drei Kriterien zu vergleichen, da je nach Anforderung unterschiedlich wichtig sind.

VII. AUFBAU DES PRAKTISCHEN VERSUCHS

Das Ziel des praktischen Versuches ist verschiedene Datenkompressionsalgorithmen anhand von Bildern zu vergleichen. Nicht alle der Algorithmen die verglichen werden sind für das Komprimieren von Bildern ausgelegt. Die Bilder müssen vorbereitet und in das richtige Format gebracht werden.

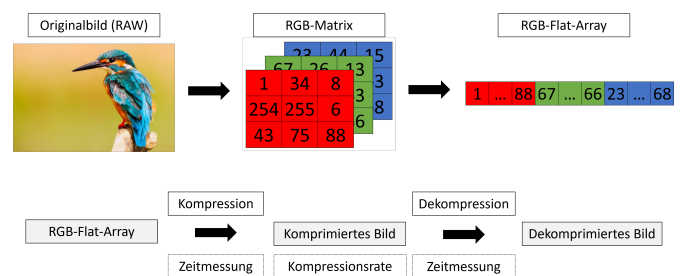


Fig. 1. Umsetzung des Versuchs

Abbildung 1 zeigt den Aufbau des Versuchs. Die erste Zeile zeigt wie das Eingangsbild in das benötigte Format umgewandelt wird. Das Originalbild das komprimiert werden soll ist unkomprimiert und unbearbeitet. Es wird im ersten Schritt in eine RGB Matrix umgewandelt. Das Konvertieren vom Originalbild zur Matrix, aber auch von der Matrix zum Originalbild ist möglich und eindeutig umkehrbar. Die Matrix hat die Form (Pixelbreite Originalbild, Pixelhöhe Originalbild, 3 Farbkanäle). Jeder der drei Farbkanäle (rot, grün, blau) beschreibt eine zweidimensionale Matrix, die für jeden Pixel den Wert der entsprechenden Farbe angibt. Im nächsten Schritt wird aus der Matrix eine flache Liste gemacht. Dazu werden alle Werte der Farbkanäle aneinandergereiht. Zuerst alle Werte von Farbkanal für rot, dann grün, dann blau.

Einige der Kompressionsalgorithmen, die verglichen werden, sind für Textdaten ausgelegt. Textdaten sind eindimensionale Daten, während Bilddaten je nach Darstellung zweidimensional oder dreidimensional sind. Mit den oben beschriebenen Schritten wird ein Bild in eine eindimensionale Form umgewandelt. Die Algorithmen können mit dieser Representation eines Bildes arbeiten.

Die untere Zeile in Abbildung 1 beschreibt den Programmablauf. Input für die Kompressionsalgorithmen ist die eindimensionale RGB Liste. Der Algorithmus komprimiert die Eingangsdaten und erzeugt die komprimierte Darstellung des Bildes, hier Komprimiertes Bild genannt. Die Zeit von Start des Algorithmus bis zum komprimierten Bild wird gemessen

und als Kompressionszeit gespeichert. Aus den komprimierten Daten wird die Kompressionsrate, wie in Formel 5 beschrieben, berechnet. Im nächsten Schritt dekomprimiert der Algorithmus die komprimierten Daten und erzeugt die ursprüngliche RGB Liste. Die Zeit für die Dekompression wird als Dekompressionszeit gespeichert.

Umsetzung in Python, high level programming language, schnell umsetzbar, aber nicht Laufzeitoptimiert Vereinfachungen/ Annahmen getroffen: - keine Optimierungen der Algorithmen, - 8-Bit Farbinformationen,

VIII. VORSTELLUNG DER KOMPRESSIONSALGORITHMEN

In diesem Abschnitt werden die verglichenen Datenkompressionsalgorithmen mit ihren jeweiligen Spezifikationen vorgestellt. Für den praktischen Teil der Arbeit wurden alle Algorithmen in der Programmiersprache Python manuell implementiert (GitHub Repo [15]). Python ist eine Hochsprachen-Programmiersprache, die es ermöglicht, die verschiedenen Algorithmen entsprechend ihrer Spezifikationen zu implementieren. Die Sprache Python wurde gewählt, da sie eine schnelle Implementierung ermöglicht. Python ist eine interpretierte Sprache und nicht auf die Laufzeit von Programmen optimiert. [16] In den Implementierungen der Algorithmen wurden keine Laufzeitoptimierungen der Algorithmen vorgenommen. Es geht in dem Versuch darum die Kompressionsalgorithmen untereinander zu vergleichen und nicht eine jeweils beste Lösung zu implementieren.

A. Run Length Encoding - RLE

RLE, auf deutsch Lauflängenkodierung, ist eine der einfachsten Kompressionsalgorithmen. Die Grundidee besteht darin, aufeinanderfolgende gleiche Elemente durch eine einzige Instanz des Elements und die Anzahl der Wiederholungen zu ersetzen. RLE ist besonders effektiv, wenn in den Daten viele aufeinanderfolgende gleiche Zeichen vorhanden sind. RLE ist eine Encoding Algorithmus und versucht die Kompression der Daten durch eine andere Struktur der Daten zu erreichen. RLE ist besonders effektiv, wenn in den Daten viele aufeinanderfolgende gleiche Zeichen vorhanden sind, da diese Redundanz durch das Zeichen und die Anzahl an Wiederholungen repräsentiert werden kann.

Die Daten die komprimiert werden sollen sind Ganzzahlwerten zwischen 0 und 255. Ein Ganzzahlwert ist ein Element und benötigt ein Byte Speicher. Die Anzahl der gleichen hintereinanderfolgenden Elemente ist die Lauflänge. Die RLE Darstellung der Daten ist: (Element, Lauflänge)*. Über dieses Encoding versucht RLE Daten zu komprimieren.

Es gibt viele leicht abweichende Spezifikationen um eine Lauflänge von einem Elementen abgrenzbar zu machen. Es gibt die Möglichkeit bestimmte Trennsymbole zu verwenden. Die Spezifikation die für den Versuch gewählt wurde, ist, dass die Lauflänge immer eine bestimmte Anzahl an Bits verwendet. Die Anzahl an Bits entspricht genau der minimalen Anzahl an Bits, mit der die maximale Lauflänge repräsentiert werden kann. Diese Bitanzahl wird benötigt um die Encodierten Daten zu Decodieren. Sie wird als ein

Byte Metadaten mitgespeichert. Weitere Metadaten sind die Auflösung des Bildes um aus den eindimensionalen Daten das Originalbild zu rekonstruieren.

Nach der gewählten Implementierung hat RLE für das Encoding, bzw. den Kompressionsschritt, eine Laufzeitkomplexität von $O(n)$, n entspricht der Länge der Ausgangsdaten. Für das Decoding, bzw. den Dekompressionsschritt hat RLE eine Laufzeitkomplexität von $O(m)$, m entspricht der Länge der encodierten Daten. [15]

B. Huffman Codierung

Die Huffman Codierung beruht auf der Idee, häufig vorkommende Zeichen in einem Datenstrom mit kürzeren Binärcodes zu repräsentieren, während seltener vorkommende Zeichen längere Codes erhalten. Der Algorithmus beginnt mit einer Analyse der Häufigkeit jedes Zeichens in den Daten. Anschließend wird ein Huffman Baum erstellt, wobei jedem Zeichen ein Blatt zugeordnet wird. Die Erstellung des Baums erfolgt so, dass häufige Zeichen kürzere Pfade im Baum haben. Jedes Zeichen erhält einen eindeutigen Binärcode. Die Zuordnung der Binärcodes erfolgt durch das durchschreiten des Huffman Baums. Eine Linksabzweigung im Baum entspricht einem Binärwert "0", rechts entspricht "1". Für die Decodierung der Encodierten Daten wird der Huffman Baum benötigt. Dieser muss als Metadaten mitgespeichert werden.

Die Datenkompression erfolgt durch Redundanzminimierung mittels Analyse der Zeichenhäufigkeiten und entsprechender Kodierung. Die Huffman Codierung ist besonders effektiv auf Daten, in denen die Wahrscheinlichkeiten der auftretenden Zeichen stark variieren. [17]

Nach der gewählten Implementierung hat die Huffman Codierung für das Encoding, bzw. den Kompressionsschritt, eine Laufzeitkomplexität von $O(n \log n)$, n entspricht Länge der Ausgangsdaten. Für das Decoding, bzw. den Dekompressionsschritt hat die Huffman Codierung eine Laufzeitkomplexität von $O(m)$, m entspricht der Länge der encodierten Daten. [17]

C. Lempel-Ziv 1977 - LZ77

Die Idee des LZ77 Algorithmus besteht darin, wiederkehrende Muster in einem Datenstrom zu erkennen und durch Verweise auf bereits übertragene Daten zu ersetzen. Der Algorithmus funktioniert, indem er eine sogenannte "Sliding Window" über den Datenstrom bewegt. Innerhalb dieses Fensters wird nach wiederkehrenden Sequenzen gesucht. Wenn eine solche Sequenz gefunden wird, wird sie durch einen Verweis auf die vorherige Instanz der Sequenz ersetzt, wobei die Position und Länge der vorherigen Instanz angegeben werden.

Die Datenkompression erfolgt durch das entfernen von Redundanz durch das Verweisen auf bereits bekannte Zeichensequenzen. Der Algorithmus ist besonders effektiv für Daten mit wiederkehrenden Mustern.

Nach der gewählten Implementierung hat LZ77 für den Kompressionsschritt eine Laufzeitkomplexität von $O(n * s)$, n entspricht der Länge der Ausgangsdaten und s entspricht

der Größe des Sliding Window. Für den Dekompressionsschritt hat LZ77 eine Laufzeitkomplexität von $O(m * s)$, m entspricht der Länge der encodierten Daten, s entspricht der Größe des Sliding Window. [15]

Eine Spezifikation die für LZ77 bei der Implementierung getroffen wurde ist, dass die Größe des "Sliding Window" auf 100 Zeichen gesetzt wurde. Eine größere Größe des Sliding Window ist mit Python ohne weitere Optimierungen nicht für große Datenmengen geeignet, da die Laufzeit sonst übermäßig ansteigt.

D. Deflate Algorithmus

Der Deflate Algorithmus kombiniert LZ77 und Huffman Codierung. Die Daten werden im ersten Schritt mit LZ77 codiert. Die Codierten Daten werden im nächsten Schritt mit Huffman weiter codiert. Zum Decodierung der komprimierten Daten werden die Decodierungsschritte von Huffman und LZ77 benötigt. Die Laufzeitkomplexität der Kompression und Dekompression entsprechen der von LZ77, da $O(n + n * s) = O(n * s)$.

E. Portable Network Graphics Algorithmus - PNG

PNG ist ein Format um Bilder zu speichern. Der PNG Algorithmus ist ein verlustfreies Bildkompressionsformat. PNG und alle Spezifikationen sind im Standard von W3C definiert. [18]

Der PNG Algorithmus kann in drei großen Schritten zusammengefasst werden. Schritt 1 ist ein Vorverarbeitungsschritt der Bilddaten die mit Hilfe von Filtern für den Kompressionsschritt vorbereitet werden. Schritt 2 ist der Kompressionsschritt. Die Daten werden mit Hilfe des Deflate Algorithmus komprimiert. Schritt 3 ist ein Cyclic Redundancy Check zur Integritätsüberprüfung.

1) *Vorverarbeitung der Bilder mit Filtern:* Der Vorverarbeitungsschritt, bzw. das Filtern, dient dazu, lokale Korrelationen und Muster in den Bilddaten zu erzeugen. Die Idee dabei ist es, dass der nachfolgende Kompressionsschritt auf den gefilterten Daten besser funktioniert als auf den ungefilterten. Der Vorverarbeitungsschritt versucht Redundanz in den Daten zu erzeugen, welche von dem Deflate Algorithmus entfernt werden kann.

Beim Filtern wird jeder Farbkanal eines Bildes einzeln betrachtet. Das Filtern erfolgt zeilenweise. Ein Filter wird auf jedem Pixel einer Zeile angewendet.

Für jede Zeile kann genau ein Filtertyp gewählt werden. Es gibt fünf verschiedene Filtertypen, die auf jeder Zeile des Bildes angewendet werden können: None, Sub, Up, Average und Paeth. Jeder dieser Filter transformiert die Werte in einer Reihe Pixelweise nach einer spezifischen Funktion.

- 1) Der None Filter verändert den Inhalt einer Zeile nicht.
- 2) Der Sub Filter berechnet die Differenzen der in einer Zeile aufeinanderfolgenden Pixel.
- 3) Der Up Filter berechnet die Differenz des Pixelwertes in der aktuellen Zeile mit dem Pixelwert der Zeile darüber.

- 4) Der Average Filter berechnet die durchschnittliche Differenz eines Pixelwertes zum Pixelwert links und darüber.
- 5) Der Paeth Filter berechnet die Differenzen zum Pixelwert links, darüber, darüber links und nimmt den minimalen Wert der Differenzen der drei Pixelnachbarn.

Die ausführlichen Spezifikationen der Filter finden sich in den W3C Spezifikationen [18] unter Abschnitt 9.

Da für jede Zeile nur ein Filtertyp angewendet werden kann, muss für die jeweilige Reihe der best passende Filtertyp gewählt werden, um die erzeugte Redundanz zu maximieren. Die Auswahl erfolgt auf Basis einer Heuristik. Die Heuristik zielt darauf ab den Filtertyp zu wählen, der am meisten Redundanz erzeugt. Die Heuristik wählt den Filtertyp für den die Summe aller Werte in einer Reihe am geringsten ist. Es gibt keine Garantie, dass der gewählte Filtertyp zu der besten Datenkompression führt. Um die tatsächlich beste Kombination an Filtertyp pro Zeile zu finden müssten alle Kombinationen ausprobiert werden. Das ist allerdings nicht möglich, da die Anzahl an Kombinationen die Filter anzuordnen exponentiell mit der Zeilenanzahl steigt. Mit der Heuristik wird das Problem umgangen.

Die Laufzeitkomplexität des Filterns eines Bildes beträgt $O(5n) = O(n)$. Die Laufzeitkomplexität um das Filtern rückgängig zu machen beträgt $O(n)$. [15]

2) *Implementierungsdetails:* Der PNG Algorithmus wird für den Versuch nicht vollständig implementiert. Schritt 3, der Cyclic Redundancy Check, wird nicht implementiert, da er für die Datenkompression irrelevant ist. Für den Kompressionsschritt in Schritt 2 des PNG Algorithmus wird der Deflate Algorithmus, wie in Abschnitt VIII-D beschrieben, verwendet. Der LZ77 Algorithmus verwendet dabei ein Sliding Window der Größe 100. Der in W3C spezialisierte Deflate, bzw. LZ77 Algorithmus, verwendet ein Sliding Window mit einer maximalen Größe von 32768. [18] Die deutlich geringere Sliding Window Größe wird bei der Auswertung berücksichtigt und hat möglicherweise einen negativen Einfluss auf die Kompressionsfähigkeit des PNG Algorithmus.

F. Filter + Huffman Algorithmus

Ein weiterer Algorithmus der verglichen wird ist eine Kombination des PNG Vorverarbeitungsschritt mit den Filtern, gefolgt von dem Huffman Algorithmus. Die Laufzeitkomplexität für die Kompression und Dekompression beträgt $O(n)$.

G. Filter + LZ77 Algorithmus

Der letzte Algorithmus der verglichen wird ist eine Kombination des PNG Vorverarbeitungsschritt mit den Filtern, gefolgt von dem LZ77 Algorithmus. Die Laufzeitkomplexität für die Kompression und Dekompression beträgt $O(n * s)$.

IX. WAHL DER TESTBILDER

Um die verschiedenen Kompressionsalgorithmen untereinander zu vergleichen wurden verschiedene Testbilder ausgewählt. Die Testbilder mit der jeweiligen Auflösung sind in Abbildung 2 zu sehen.



Fig. 2. Testbilder mit Auflösung

Es wurden sehr unterschiedliche Bilder gewählt. Sie unterscheiden sich sowohl im Motiv als auch in der Bildauflösung. Die verschiedenen Bildauflösungen wurden gewählt, um die Laufzeit der Algorithmen auf unterschiedlich großen Eingangsdaten zu vergleichen. Die Motive sind unterschiedlich aber nicht zufällig gewählt. Das Bild der Deutschlandflagge und das Bild der Folie haben viele Bildpunkte mit identischer Farbe. In den Daten ist viel Redundanz enthalten. Die Bilder wurden gewählt, da sie aus monotonen Teilbereichen bestehen und viele Wiederholungen in den Daten vorhanden sind.

Das Bild Fade 1 und Fade 2 zeigen einen Farbverlauf. Die Daten enthielten eine große Anzahl an Farbwechsel. Die Farbwechsel sind nicht zufällig sondern nach einem Farbverlauf Muster. Fade 1 hat im Großteil des Bildes kaum Rotanteile, während Fade 2 einen Farbverlauf mit den Grundfarben rot, grün und blau hat.

Das Bild der Frau und das Bild mit den Katzen sind reale Bilder. Sie zeigen echte Sachverhalte und beschreiben die Struktur von natürlichen Bildern.

1) *Erwartungen:* Nach der theoretischen Betrachtung der Algorithmen und der Datenkompressionsverfahren können einige Erwartungen aufgestellt werden. Der RLE Algorithmus sollte vor allem bei den Bildern der Flagge und Folie gut sein, da er Redundanz in Form von Wiederholungen entfernt. Alle anderen Algorithmen sollten ebenfalls die Redundanz entfernen können. Die Erwartungen für die Bilder Fade 1 und Fade 2 sind, dass sie standardmäßig schlecht komprimiert werden können. Der Datenvorverarbeitungsschritt mit dem Filter sollte zu einer Verbesserung führen. Bei den natürlichen Bildern sollte vor allem PNG gut funktionieren, während der RLE Algorithmus schlecht abschneidet.

X. ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

Tabelle I zeigt die auf den Testbildern erzielten Kompressionsraten der Algorithmen. Alle Angaben sind in Prozent und wurden mit der Formel 5 berechnet.

Generelle Aussage: - Average

Auffälligkeiten - RLE Datenkomp. Größe, Größe -> wie erwartet, gut. Bilddaten Flagge aus Wiederholungen. Redundanz sehr effizient entfernt werden

- Huffman schlecht bei Fade, Filter + Huffman krank gut -> Datenvorverarbeitungsschritt Filtern, bringt deutliche Verbesserung und Erzeugt Redundanz, die vom Huffman Algorithmus entfernt werden kann. - vlt neg Werte

Jeden Alg. einzeln was sagen kurz: Huffman alleine keine guten Ergebnisse, da viele Zeichen häufig vorkommen. Huffman kein als einziges kein negatives Ergebnis. -> keine Vergrößerung der Daten

Fazit: - Filtern heftig

XI. EVALUATION

REFERENCES

- [1] F. M. Ingels, *Information and coding theory*. Scranton, Intext Educational Publishers, 1971.
- [2] J. S. Peter Maluck, "Quellencodierung, gelenktes entdeckendes lernen," *EducETH*, 2009.
- [3] E. Burke, "Schallquellensystem zur untersuchung der wahrnehmung von infraschall in kombination mit hörschall," *Physikalisch-Technische Bundesanstalt*, 2019.
- [4] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379–423, 1948. [Online]. Available: <http://plan9.bell-labs.com/cm/ms/what/shannonday/shannon1948.pdf>
- [5] C. E. Shannon and W. Weaver, *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana, IL: University of Illinois Press, 1949.
- [6] B. Friedrichs and B. Friedrichs, "Grundlagen der shannon'schen informationstheorie," *Kanalcodierung: Grundlagen und Anwendungen in modernen Kommunikationssystemen*, pp. 33–68, 1996.
- [7] S. Pieper, "Wo liegt der unterschied zwischen daten, informationen und wissen?" <https://www.artegic.com/de/blog/wo-liegt-der-unterschied-zwischen-daten-informationen-und-wissen/>, 2017, [Online; accessed 01.12.2023].
- [8] D. Sharma and S. Saxena, "Generalized coding theorem with different source coding schemes," *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, vol. 5, no. 6, pp. 253–257, 2017.
- [9] M. Li, P. Vitányi et al., *An introduction to Kolmogorov complexity and its applications*. Springer, 2008, vol. 3.
- [10] P. M. Vitányi, "How incomputable is kolmogorov complexity?" *Entropy*, vol. 22, no. 4, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1099-4300/22/4/408>
- [11] M. Nelson, "The random compression challenge," <https://marknelson.us/posts/2012/10/09/the-random-compression-challenge-turns-ten.html>, 2012, [Online; accessed 03.12.2023].
- [12] R. Corporation, *A Million Random Digits with 100,000 Normal Deviates*. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2001.
- [13] X.-R. Color, "Additive farbmischung," <https://www.xrite.com/de/blog/what-is-additive-rgb-color-mixing>, 2022, [Online; accessed 06.12.2023].
- [14] I. Chivers, J. Sleightholme, I. Chivers, and J. Sleightholme, "An introduction to algorithms and the big o notation," *Introduction to Programming with Fortran: With Coverage of Fortran 90, 95, 2003, 2008 and 77*, pp. 359–364, 2015.
- [15] N. Schreiber, "Sti-repo," <https://github.com/NickStudRepo/STI-Repo/>, 2023.
- [16] N. Altshuler, "Why is python so slow? - tackling python's performance issues," <https://bodyvisionmedical.com/articles/why-is-python-so-slow-tackling-pythons-performance-issues>, 2019, [Online; accessed 10.12.2023].
- [17] A. MOFFAT, "Huffman coding," *ACM Comput. Surv.*, 2019.
- [18] "Portable network graphics (png) specification (second edition)," <https://www.w3.org/TR/2003/REC-PNG-20031110/>, 2003, ISO/IEC 15948:2003 (E).

TABLE I
KOMPRESSIONS RATEN

Name	Auflösung	RLE	Huffman	LZ77	Deflate	Filter + Huffman	Filter + LZ77	PNG
Flagge	(290, 174)	99,98	77,85	78,85	91,70	87,38	84,69	91,80
Fade 1	(318, 159)	45,73	14,30	25,87	31,90	84,94	78,13	80,69
Frau	(512, 512)	-39,19	2,74	-10,96	-9,51	38,22	-7,41	3,38
Folie	(945, 718)	84,57	56,87	73,48	76,62	84,90	81,66	87,03
Katzen	(1289, 720)	-42,85	2,11	-11,39	-9,31	25,49	-10,42	-2,45
Fade 2	(1670, 954)	78,95	10,95	62,13	66,95	85,74	80,59	83,74
Durchschnitt		37,87	27,47	36,33	41,40	67,78	51,21	57,37

¹ Angaben in Prozent, gerundet auf zwei Nachkommastellen

² Bilder nach Größe aufsteigend sortiert

TABLE II
KOMPRESSIONSZEITEN

Name	Auflösung	RLE	Huffman	LZ77	Deflate	Filter + Huffman	Filter + LZ77	PNG	Filter
Flagge	(290, 174)	0,015	0,017	2,3	2,3	1,3	3,3	3,3	1,3
Fade 1	(318, 159)	0,028	0,018	14	14	1,6	5	5	1,6
Frau	(512, 512)	0,21	0,09	139	139	9	131	131	9
Folie	(945, 718)	0,47	0,24	63	63	22	62	62	22
Katzen	(1289, 720)	0,77	0,33	530	530	32	540	540	32
Fade 2	(1670, 954)	0,61	0,55	200	200	51	140	140	51

¹ Angaben in Sekunden

² Bilder nach Größe aufsteigend sortiert

³ Die Spalte Filter gibt die Filterzeit an

TABLE III
DEKOMPRESSIONSZEITEN

Name	Auflösung	RLE	Huffman	LZ77	Deflate	Filter + Huffman	Filter + LZ77	PNG	Revert Filter
Flagge	(290, 174)	0,003	0,012	0,120	0,124	0,124	0,255	0,255	0,120
Fade 1	(318, 159)	0,032	0,048	3,5	3,5	0,008	0,500	0,550	0,220
Frau	(512, 512)	0,395	0,293	308	308	1,4	230	230	1,4
Folie	(945, 718)	0,769	0,321	82	82	3	35	35	2,9
Katzen	(1289, 720)	1,4	1	1200	1200	5,1	1205	1205	5
Fade 2	(1670, 954)	0,480	1,5	732	732	7	184	184	7

¹ Angaben in Sekunden

² Bilder nach Größe aufsteigend sortiert

³ Die Spalte Revert Filter gibt die Zeit an, in der die Filterung rückgängig gemacht wird