Das Maß der Unordnung

W.A. Kreiner Faculty of Natural Sciences University of Ulm

Abschnitt		Seite
1	**Anordnungen und ihre Funktion**	3
2	**Die Wahrscheinlichkeit einer Verteilung**	4
3	**Ordnung und Unordnung**	7
3.1	**Ein Schreibtisch in Zahlen**	8
3.2	**Entropiebeträge von Ordnung und Unordnung**	9
4	**Entropie, Information und das Maß des fehlenden Wissens**	10
5	**Entropie, Ordnung und Unordnung in einzelnen Wissenschaftsbereichen**	11
5.1	**Ordnungsprinzipien der Gestaltpsychologie**	11
5.2	**Architektur**	12
5.3	**Kunst**	13
5.4	**Entropie in den Sozialwissenschaften**	14
5.5	**Industrielle Produktion**	14
5.6	**Vermögensverteilung**	14
5.7	**Psychologische Entropie**	14
6	**Zusammenfassung**	14
	Anhang: **1. Der historische Entropiebegriff**	15
	2. Thermodynamik und Informationstheorie. Vergleich der Entropiebegriffe	16
	Literatur	17

1 Anordnungen und ihre Funktion

Überlässt man es dem Zufall, wo etwas nach seiner Verwendung wieder auf dem Arbeitstisch landet, dann werden sich die Utensilien nach und nach auf stets andere Weise verteilen. Und dafür gibt es viele Möglichkeiten.

Bild 1 An einem unaufgeräumten Schreibtisch ist eine Vielfalt unterschiedlicher Anordnungen denkbar – und er wird immer noch gleich aussehen. Die wesentliche Funktion des aufgeräumten Zustands besteht darin, dass man das Gesuchte mit einem Minimum an Aufwand findet. Überlässt man alles dem Zufall, dann ist es unwahrscheinlich, dass sich der aufgeräumte Zustand von selbst einstellt. Deshalb gilt die Zahl der möglichen zufälligen Anordnungen auch vielfach als Maß für die Unordnung.

Bestimmt man die Zahl *aller nach dem Zufallsprinzip denkbaren Möglichkeiten, die einzelnen Elemente* irgendwie zu platzieren, dann sind alle Verteilungen vom physikalischen Standpunkt aus gleichwertig. Aber subjektive Kriterien der Zweckmäßigkeit oder Zielsetzung bestimmen, welche davon als Ordnung gelten. Je größer die Zahl der möglichen zufälligen Anordnungen, desto geringer ist die Chance, dass sich auch einmal von selbst ein geordneter Zustand ergibt. Man kann eine Zahl bestimmen, die etwas über die Wahrscheinlichkeit aussagt (das sog. „statistische Gewicht“), mit der sich Unordnung einstellt, wenn man alles sich selbst überlässt. Meist eine große Zahl. Ein geordneter Zustand ist selten und hat ein kleines ist statistisches Gewicht.

Ist ein System ständigen Veränderungen ausgesetzt, verliert es in der Regel eine eventuell anfangs noch vorhandene Funktionsfähigkeit.

2 Die Wahrscheinlichkeit einer Verteilung

Dass man Vielfalt mit einer Zahl und diese Zahl mit einer Wahrscheinlichkeit in Verbindung bringen kann, spielte ursprünglich in der Physik eine wichtige Rolle, weil man damit erklären konnte, weshalb Gase – etwa Kaffeeduft oder das Vanillearoma eines Kuchens – sich spontan über den gesamten zur Verfügung stehenden Raum ausbreiten. Ludwig Boltzmann (2008) deutete das so, dass die Moleküle in einem größeren Raum mehr unterschiedliche Möglichkeiten für eine Verteilung haben.

Um dafür eine Zahl zu ermitteln, unterteilt man den Raum in Bereiche, in denen jeweils nur wenige Moleküle Platz finden (Bild 2). Erst gibt man in ein einzelnes Raumelement zwei Moleküle (Bild 2a). Öffnet man den Molekülen einen weiteren Teilbereich (Bild 2b), dann wird sich jedes der beiden Moleküle aufgrund seiner Beweglichkeit mal im einen oder anderen Bereich aufhalten. Für eine Ausbreitung über beide Bereiche gibt es dabei zwei Möglichkeiten. Blickt man ab und an hin, dann wird man doppelt so oft den verteilten Zustand sehen im Vergleich zu einem, bei dem sich beide Moleküle in der linken oder der rechten Raumhälfte zusammenfinden. Er ist doppelt so wahrscheinlich und hat das

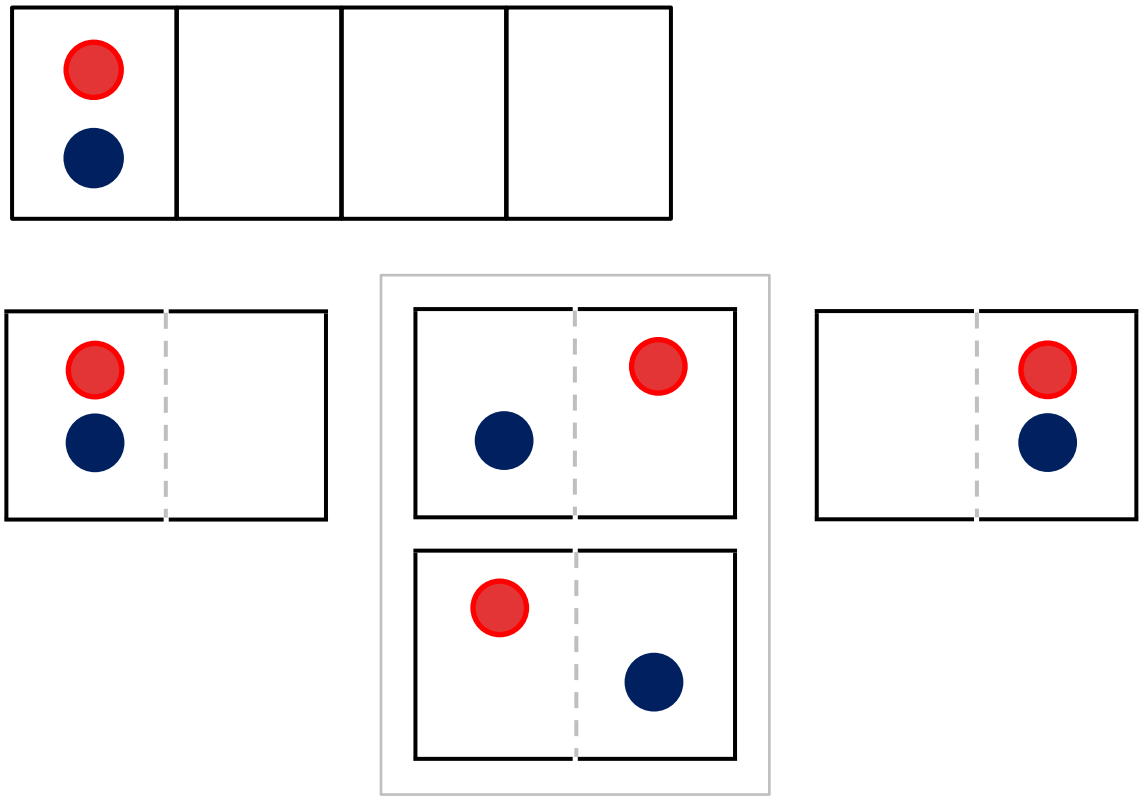


Bild 2a (links oben): Man unterteilt den Raum gedanklich in einzelne Bereiche. Anfangs befinden sich in einem Raumelement zwei Moleküle. **2b** (darunter): Haben die Moleküle mehr Platz zur Verfügung, dann können sie sich auf unterschiedliche Arten verteilen. Es gibt zwei Möglichkeiten, sich über beide Raumelemente auszubreiten. Dieser Zustand ist somit doppelt so wahrscheinlich wie einer, bei dem sich beide nur in der linken oder der rechten Hälfte aufhalten. Äquivalente Aufteilungen werden zusammen als Makrozustand bezeichnet (grauer Rahmen).

statistische Gewicht W=2. Jede der vier gezeigten Möglichkeiten wird als *Mikrozustand* bezeichnet, äquivalente Verteilungen bilden zusammen einen *Makrozustand*.

- *Die Anzahl der Möglichkeiten, dass sich die Moleküle in einer bestimmten Weise über den Raum verteilen können, ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass diese Aufteilung beobachtet wird.*

Für den Logarithmus des statistischen Gewichts, **S** = ln**W**, wählte Boltzmann (2008) den schon von Clausius (NN 1) verwendeten Ausdruck Entropie. Die Entropie ist also ein logarithmisches Maß für eine Wahrscheinlichkeit.

In Bild 3 werden vier Früchte über vier Kästchen verteilt. Wie viele Möglichkeiten gibt es? Die Formel für das statistische Gewicht W eines bestimmten Aufteilungsmusters lautet:

$$W = \frac{N!}{n_1!\, n_2! n_3! n_4!} \qquad \text{[EQ 1]}$$

Das N ist die Anzahl aller Früchte, die n_1 …. n_4 bedeuten deren Zahl in den einzelnen Teilbereichen. N! – gesprochen „N Fakultät“ – bedeutet: N(N-1)(N-2) …. 1. Sind die Früchte im linken unteren Bereich versammelt (Bild 3, links), dann wird das

$$W = \frac{4!}{4!\ 0!0!0!} = = \frac{4\cdot3\cdot2\cdot1}{4\cdot3\cdot2\cdot1\cdot\ 1\cdot1\cdot1} = 1 \qquad \text{(wobei 0! = 1)} \qquad \text{[EQ 2]}$$

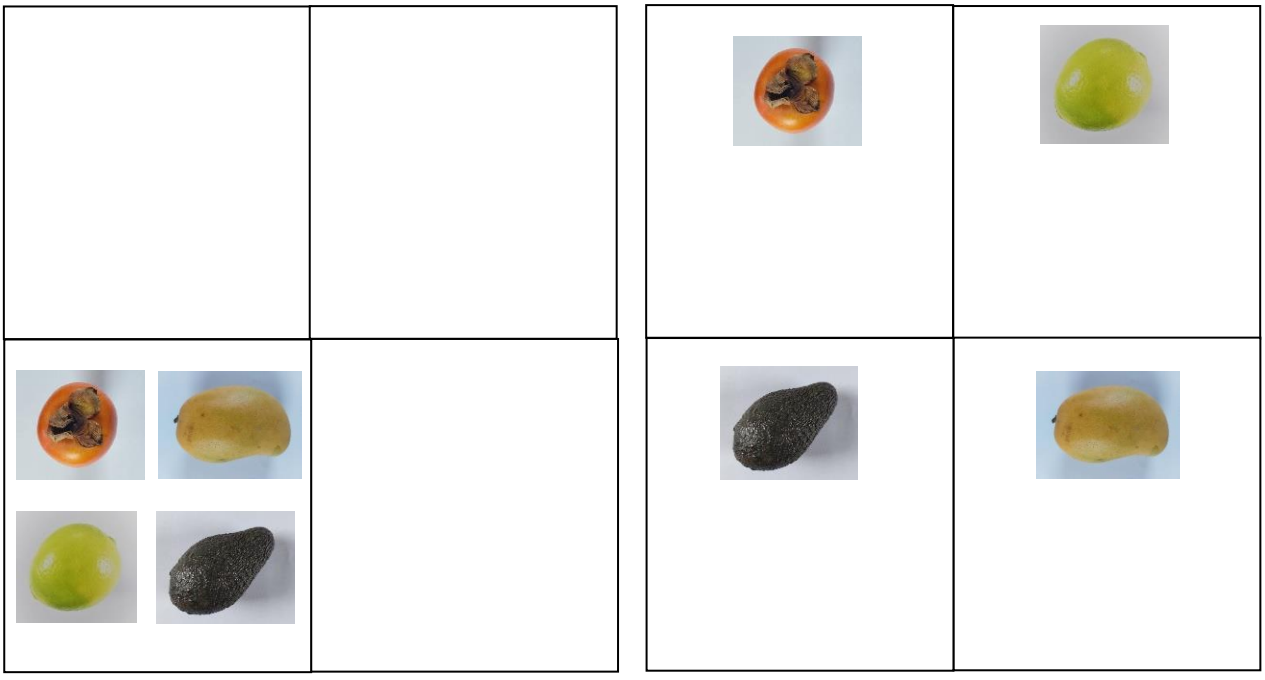


Bild 3 Aufteilung links: Kaki, Mango, Zitrone und Avocado, zusammen in einem Kästchen, die restlichen leer. Rechts: Auf vier Räume gleichmäßig verteilt. Für diesen Fall gibt es 24 Möglichkeiten. Alle denkbaren Aufteilungsmuster umfassen zusammen 256 Möglichkeiten, die Früchte in unterschiedlicher Weise zu platzieren.

Das ist die einzige Möglichkeit. Verteilt man die Früchte gleichmäßig auf die 4 Felder, dann ergibt das einen Makrozustand mit 24 Möglichkeiten:

$$W = \frac{N!}{n_1!\, n_2! n_3! n_4!} = \frac{4!}{1!\, 1!1!1!} = 24$$

Die erste Frucht kann sich 4 Kästchen aussuchen, die zweite 3 und die dritte noch 2. Die Division durch n! erfolgt deshalb, weil ein Vertauschen *innerhalb* eines Kästchens (dafür gäbe es n! Möglichkeiten) keine neue Aufteilung *zwischen* den Teilbereichen bringen würde.

Je gleichmäßiger die Aufteilung, desto größer ihr statistisches Gewicht W.

Es gibt auch noch andere Aufteilungsmuster (Makrozustände), etwa wenn die Früchte paarweise angeordnet sind. Die Formel für die Gesamtzahl aller Mikrozustände lautet

$$W_{gesamt} = Kästchen^{Früchte} = 4^4 = 256 \qquad \text{[EQ 3]}$$

Deshalb breitet sich der Duft eines Parfüms aus oder Erdöl aus einem leckgeschlagenen Tanker. Dass es sich wieder zurückzieht ist denkbar, aber nicht wahrscheinlich.

- Entropie ist ein logarithmisches Maß für die Wahrscheinlichkeit eines Makrozustands.
- Ein M**a**krozustand ist ein bestimmtes geometrisches Verteilungsmuster und umfasst alle ähnlichen Mikrozustände. Ihre Zahl ist sein statistisches Gewicht W. Ähnliche Zustände bieten dasselbe Gesamtbild, unterscheiden sich aber dadurch, dass die Elemente zwischen den Kästchen permutiert sind.
- Es gibt mehrere Makrozustände, sie entsprechen unterschiedlichen geometrischen Aufteilungsmustern.
- Je gleichmäßiger die Verteilung über den Raum, desto größer das statistische Gewicht W dieses Makrozustands, seine Wahrscheinlichkeit und seine Entropie.
- Eine Bewertung im Sinn von Ordnung oder Unordnung ist vom physikalischen Standpunkt aus mit der Bezeichnung Makrozustand und seiner Größe nicht verbunden.

Energie kann übertragen werden, Entropie nicht (ebenso wenig wie eine andere Zustandsvariable, das Volumen: Erhitzt man z.B. mit einem Bunsenbrenner eine Substanz, die sich dabei ausdehnt, dann hat man Wärme übertragen, nicht aber Volumen). Eine Energieübertragung kann allerdings unterschiedliche Entropiezustände zur Folge haben, umgekehrt kann sich die Entropie auch ohne Energietransfer ändern. In physikalischem Zusammenhang ist eine Verringerung der Entropie nur durch eine Erhöhung an anderer Stelle möglich. Ein Beispiel dafür ist die Umkehrosmose zur Trinkwassergewinnung (NN 2). Herrschen Kräfte zwischen den Teilchen, ist die Zufallsverteilung stark eingeschränkt.

3 Ordnung und Unordnung

Unordnung orientiert sich am Begriff Ordnung. Dieser bedeutet, dass mehrere Teile in einer ganz bestimmten, systematischen Zusammenstellung eine Aufgabe erfüllen können und damit - nach von Menschen festgelegten Kriterien - eine bestimmte Funktion haben. So dient die alphabetische Ordnung von Büchern dem Auffinden einer Schrift. Ein komplexes System, wie etwa ein Auto, ist dann in Ordnung, wenn es fährt. Eine Gesellschaft beruht auf einer bestimmten Ordnung im Sinn eines Systems sozialer, geregelter Beziehungen. Etwas ist moralisch in Ordnung, wenn es nach ethischen Grundsätzen die Funktion der Nachhaltigkeit erfüllt. Buchstaben in einer bestimmten Anordnung bilden ein Wort im Sinn eines Begriffs, Töne eine Melodie, Linien, Formen und Farben ein Werk der bildenden Kunst. Für viele Menschen ist auch die Welt „in Ordnung".

Im abstrakt physikalischen Sinn sind alle Verteilungsmuster – ob mit großem oder kleinem statistischem Gewicht – gleichwertig. Für den Ordnungs- im Sinn eines Funktionsbegriffs gelten vom Menschen gesetzte Kriterien. Auf einem Schreibtisch ist wichtig, welches Ding wo und in welcher Nachbarschaft liegt, als Kriterium der praktischen Handhabbarkeit. Während in vielen Fällen die Funktionsfähigkeit entscheidet (ein gut organisierter Arbeitsplatz, die alphabetische Reihenfolge, eine ordnungsgemäße Buchführung), sind es bei der Kombination von Linien und Formen zu Ornamenten oder auch von Tönen zu Melodien ästhetische Kriterien [siehe auch „Gestaltpsychologie"; (NN 3)].

Wie weit entfernt vom Ordnungszustand eine vorliegende Unordnung ist ergibt sich im einfachsten Fall aus der Zahl der Gegenstände oder Elemente, deren Position man ändern oder die man austauschen müsste, um den geordneten Zustand herzustellen. Das bezieht sich auf eine ganz bestimmte Zielvorstellung. Ordnung ist jedoch nicht nur auf ein schon bekanntes Schema begrenzt. So wird in vielen Fällen des Alltags (Mode, soziale Verhaltensweisen, Kunst) auch experimentiert, um Anordnungen mit einem möglichen neuen Funktionscharakter zu finden.

Während z.B. das Einordnen von Schriftstücken nach Eingangsdatum ein für alle Menschen nachvollziehbares Kriterium bildet, ist Ordnung in der Bedeutung von „aufgeräumt" oft individuell bestimmt.

Auch für Ordnung und Unordnung können Mikro- und Makrozustände definiert werden. Während aber im physikalischen Sinn alle *geometrisch ähnlichen* Verteilungen einen Makrozustand bilden (bei denen jeweils eine *bestimmte Anzahl von Utensilien* in einem Raumelement liegt, Bild 4), wird vom Ordnungszustand verlangt, dass sich ganz *bestimmte Gegenstände* in Nachbarschaft zueinander befinden (also etwa alle Büroklammern beisammen sind). Das schränkt die Zahl der Möglichkeiten erheblich ein.

Während nach der physikalischen Vorstellung eine Konzentration der Elemente auf einen kleinen Raumbereich als Zustand niedriger Entropie gilt, bedeutet der Ordnungsbegriff zwar ebenfalls einen wenig wahrscheinlichen Zustand, jedoch nach Kriterien der Funktions-fähigkeit. Eine einzelne ganz spezielle großräumige Verteilung ist dabei durchaus möglich.

Ordnungszustände sind in der Regel selten und haben ein kleines statistisches Gewicht. Ordnung verdankt ihr Alleinstellungsmerkmal der Tatsache, dass sie zweckmäßig ist. Hohe Entropie – im Sinn von Vielfalt und als Folge des blinden Zufalls – hat oft eine negative Bedeutung.

3.1 Ein Schreibtisch in Zahlen

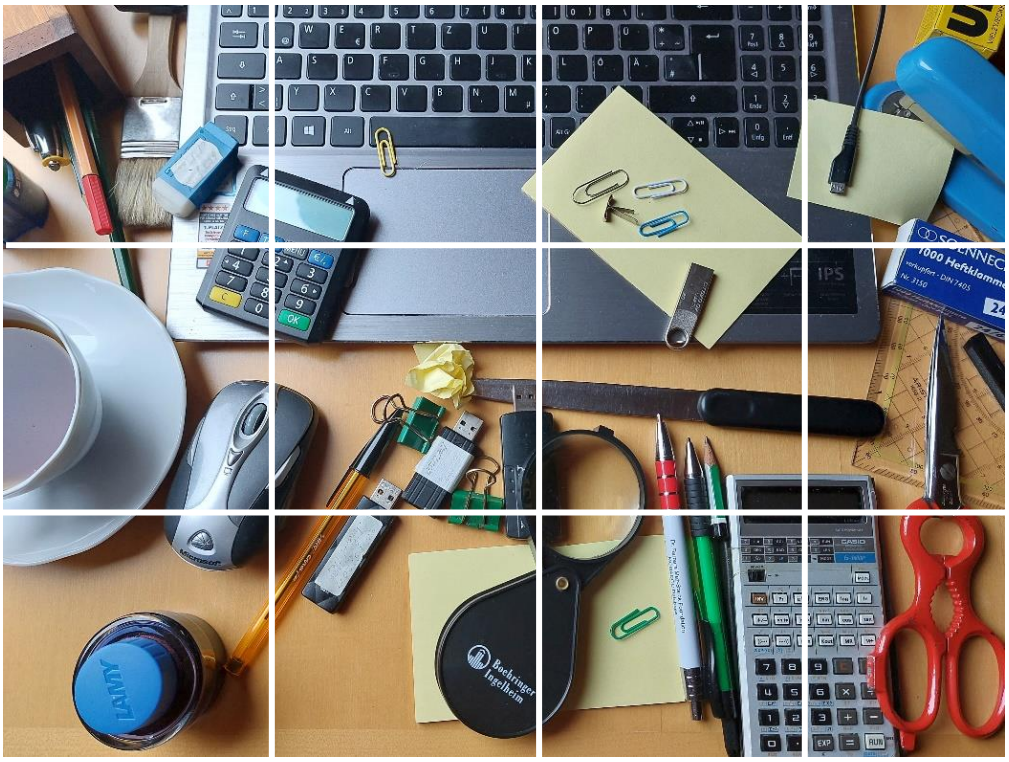


Bild 4 In jedem Kästchen befinden sich in etwa so viele Utensilien:

5	3	5	4
2	5	3	3
1	3	5	2

Auf dem Schreibtisch (Bild 4) sind 41 Gegenstände über 12 Kästchen verteilt. Wie viele Möglichkeiten gibt es, die Dinge so zu platzieren, dass wieder dieselbe Zahl von Utensilien in jedem Kästchen liegt, nur eben mit anderen kombiniert? Die Zahl der Anordnungsmöglichkeiten durch Vertauschung zwischen den 12 Feldern beträgt

$$\boldsymbol{W} = \frac{41!}{5!3!5!4!2!5!3!3!1!3!5!2!} = \quad 1{,}30\ \text{E}36 \qquad \text{und} \qquad \mathbf{S} = \ln W = 83{,}15$$

3.2 Entropiebeträge von Ordnung und Unordnung

Im folgenden Beispiel werden vier Buchstaben in beliebiger Reihenfolge angeordnet. Man geht vom Wort „HAHN“ aus und bestimmt, wie viele Kombinationen dieser Buchstaben es gibt, wie etwa NHAH oder AHHN, so, als wären die Buchstaben bewegliche Moleküle und

H	A	H	N
H	A	N	H
H	H	A	N
H	N	A	H
H	H	N	A
H	N	H	A
A	H	H	N
A	H	N	H
H	H	A	N
N	H	A	H
H	H	N	A
N	H	H	A
A	H	H	N
A	N	H	H
H	A	H	N
N	A	H	H
H	N	H	A
N	H	H	A
A	H	N	H
A	N	H	H
H	A	N	H
N	A	H	H
H	N	A	H
N	H	A	H

1. Die Entropie in physikalischen Sinn beträgt S = lnW = ln24 = 3,178.

2. Infolge einer Bewertung zerfällt die Vielfalt der Buchstabenkombinationen in zwei Gruppen:

- Zwei Buchstabenfolgen ergeben das Wort „Hahn“, sie sind nach einem Bedeutungskriterium *geordnet*. Die Entropie beträgt S = lnW = ln2 = 0,693.

- 22 Buchstabenfolgen ergeben keinen Sinn, gelten als *ungeordnet*. Deren Entropie hat den Betrag S = lnW = ln22 = 3,091.

Das entspricht der verbreiteten Bedeutungszuschreibung:

Höhere Entropie = Unordnung.

tauschten ständig ihre Positionen aus. Wie viele Kombinationen sind es insgesamt (gleichwertig im physikalischen Sinn), wie viele würden das Kriterium „geordnet“ erfüllen (ein Wort mit Bedeutung) und wie viele würden als „ungeordnet“ eingestuft werden (ohne Bedeutungsinhalt)? Wie lauten die statistischen Gewichte und die Entropiebeträge?
Es gibt $W = \frac{4!}{1!1!1!1!} = 24$ Möglichkeiten, in jedes Kästchen einen Buchstaben zu setzen (physikalischer Makrozustand). Nach vom Menschen gesetzten Kriterien zerfällt er in einen Makrozustand der Unordnung mit einem statistischen Gewicht von W=22 und einen Makrozustand der Ordnung mit W=2.

In biologischen Systemen herrschen Strukturen vor, die durch Kräfte zwischen den Molekülen aufrechterhalten werden. Sie unterliegen nur zum geringen Teil zufälligen Veränderungen. Auch soziale Systeme werden durch Strukturen stabilisiert. Insgesamt ist der physikalische Entropiebegriff im Sinn einer reinen Zufallsverteilung auf Phänomene der Gesellschaft nur bedingt anwendbar.

4. Entropie, Information und das Maß des fehlenden Wissens

Man möchte wissen, in welchem Bundesland die Bundesgartenschau 2050 stattfinden wird. Es sind 16 Länder, also 2^4. Diese 4 ist die Anzahl der Fragen, mit der man auf die Lösung kommen kann. Der Exponent heißt „die Information I“, in diesem Fall ist I=4.

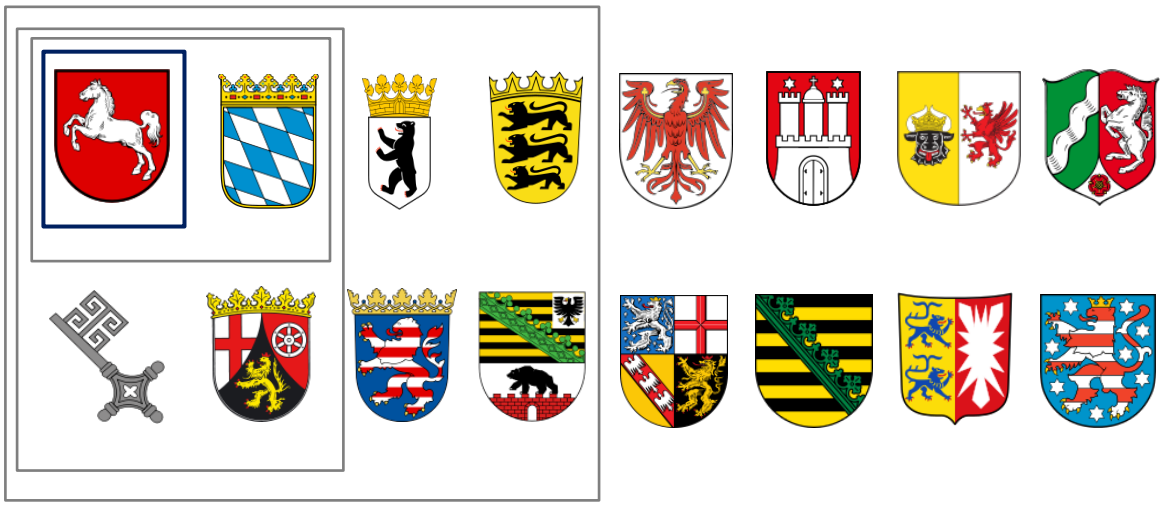


Bild 5 Die Wappen der Bundesländer (NN 4)

Wartet man auf eine Mitteilung mit der entsprechenden Nachricht, dann kennt man vorerst nur die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes Bundesland die Schau ausrichtet. Sie ist

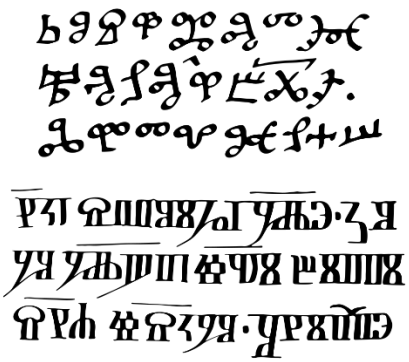
$$\mathbf{p}_i = 1/16.$$

Die entsprechende Information I ist dann der negative ld (Logarithmus dualis, Zweierlogarithmus) der Wahrscheinlichkeit (NN 5):

$$I = - \text{ld}(\mathbf{p}_i) = -\text{ld}(1/16) = 4 \qquad [\text{ EQ 4}]$$

Zu ihrer Übermittlung benötigt man 4 Bit, eine vierstellige Zahl im Binärcode. Hat man ein Alphabet zur Verfügung (als Beispiel Bild 6), dann ist es möglich, den Mittelwert der Information aller Buchstaben i zu berechnen. Dazu bestimmt man erst die Information eines jeden Buchstabens i nach [EQ 4]. Da er aber nur mit dem Bruchteil p_i zur Information des gesamten Alphabets beiträgt, muss man noch mit p_i multiplizieren und dann summieren.

Bild 6 Zwei Formen der „Glagolitischen Schrift“ (NN 6)



Man erhält die *mittlere Information eines Zeichens aus diesem Alphabet*:

$$\boldsymbol{H = \; -\sum_{i=1}^{m} p_i \cdot log_2 p_i} \qquad \text{[EQ 5]}$$

Sind alle Zeichen gleich häufig, dann erreicht das H seinen Maximalwert, übermitteln nur wenige Zeichen den größten Teil der Information, ist H klein. Das H ist also ein Maß für die Vielfalt der Zeichen, die die Information transportieren und so heißt das H „die Entropie“. Wären alle 26 Buchstaben gleich häufig, dann erhielte man

$$H_{26} = - 26 \cdot [(1/26) \cdot \log_2(1/26)] = \; 1 \cdot 4{,}700 = \mathbf{4{,}700\ bit}$$

Für die deutsche Sprache (NN 7) ist der *Mittelwert der Information* für einen durchschnittlichen Buchstaben $\mathbf{H_{26} = 4{,}087\ bit}$. Das H gilt oft als die Unsicherheit über das Ergebnis, bevor man es erhält, aber auch als Information, wenn das Ergebnis da ist. Umfasst ein Text Z Zeichen, dann sind Z·H Bit zur Übermittlung der Information erforderlich.

5 Entropie, Ordnung und Unordnung in einzelnen Wissenschaftsbereichen

Entropie wird als Synonym für Vielfalt gebraucht. Da jedoch die meisten Anordnungen nicht eine positiv bewertete Funktion aufweisen, erhält Entropie oft eine Bedeutung im Sinn von „Beliebigkeit“ und wird mit Vorstellungen wie „von geringem Nutzen“ oder auch „Chaos“ assoziiert. In dieser Form hat die Entropie Eingang gefunden in unterschiedliche Wissenschaftsbereiche.

5.1 Ordnungsprinzipien der Gestaltpsychologie

Als *Gestaltpsychologie* wird eine Richtung innerhalb der Psychologie bezeichnet, die die menschliche Wahrnehmung als Fähigkeit beschreibt, Strukturen und Ordnungsprinzipien in Sinneseindrücken auszumachen [Von Ehrenfels (1890); NN 3; NN 8]. So kann ein Lied in einer anderen Tonart gesetzt sein und damit in ganz anderen Noten, und trotzdem bleibt es dasselbe Lied. An scheinbar wahllos in einer Fläche verteilten Kreisen werden Gruppierungen ausgemacht, Bremslichter, die gleichzeitig aufleuchten, werden als zusammengehörend

identifiziert. Ein unvollständiger Schriftzug oder ein Text werden vervollständigt. So werden Sinneseindrücke nach einer möglichen Funktionalität gefiltert bzw. in der Vorstellung ergänzt und eine Vielzahl einzelner Elemente nach möglichen Ordnungsprinzipien sortiert.

5.2 Architektur

Vergleicht man ein Gebäude in seinem intakten Zustand mit dem, nachdem es abgebrochen wurde, dann kann man den Unterschied so beschreiben: Während man beim funktionsfähigen Bau nur Weniges – zumindest gedanklich – vertauschen könnte, ohne dass es stört (eventuell Fenster gleicher Größe und Konstruktion oder einzelne Dachplatten), kann man an dem Berg von Schutt ungezählte Teile in ihren Positionen verändern, und er wird immer noch gleich aussehen. Auch wenn man nur einen ganz bestimmten Trümmerhaufen vor sich hat, schreibt man ihm dennoch eine viel höhere Entropie lnW zu als dem intakten Bauwerk. Man stellt sich dazu vor, wie viel ganz ähnliche Zustände beim Abbruch hätten resultieren können. In der Architektur wird eine Ruine so beschrieben [Siefert (2016)]:

„Die Ruine ist eine Metapher für Scheitern und Neubeginn. Sie führt uns die Utopie vor Augen und das Vergehen von Ideen und Zielen. Herausgehoben aus der funktionalen Verwendungsgesellschaft ist sie Insel der Zeitlosigkeit, diese Vergänglichkeit wird als Entropie beschrieben. Dieser Begriff - aus der Naturwissenschaft entlehnt - beschreibt den Zustand der größtmöglichen Unordnung und des gleichförmigen Chaos. Die Endgültigkeit darin mündet in Pessimismus.“

Hier wird die bei einer Bauruine vorhandene Vielfalt in poetisch-melancholischer Form für Vergänglichkeit gesetzt.

Moeves (1995) assoziiert Entropie generell mit verunglückter Architektur.

Schorre (2015) betrachtet, im Hinblick auf architektonische Projekte, Systeme, die durch Weiterentwicklung zunehmend komplexer werden, da man immer mehr Teilsysteme integriert, die jedoch oft an den Schnittstellen nicht optimal zusammenpassen. Diese zunehmende Anzahl von Fehlerquellen wird als „System-Entropie“ bezeichnet. Das Negative an der Vielfalt liege hier darin, dass die allermeisten Abänderungen oder eingefügten Teile keine Verbesserung oder sogar das Gegenteil zur Folge haben und nur wenige, die das System auf eine höhere Stufe bringen.

Geht man von einer bestimmten Anordnung der Bau- oder auch Stilelemente in einer eindrucksvollen architektonischen Schöpfung aus, dann liegt die Vermutung nahe, dass eine Erhöhung der Vielfalt durch Austausch oder Hinzufügen beliebiger Elemente meist keinen Zuwachs an Qualität bedeutet. Das Motto „form follows function“ des Bildhauers Horatio Greenough bzw. des Architekten Louis Henry Sullivan schließt eine Beliebigkeit architektonischer Vielfalt und hohe Entropie aus (NN 9).

5.3 Kunst

5.3.1 Es wird auch versucht, Entropie in Gemälden auszudrücken, wie in Bild 7 von Huber [Marcolli (2015)]. Es zeigt eindrucksvolle Farbklekse, die markante Farbspritzer aussenden. Diese wecken im Betrachter die Vorstellung, man könnte sie in vielfältiger Weise vertauschen, ohne dass sich der an ein Chaos erinnernde Gesamteindruck grundlegend verändert. Während es in einem naturalistischen Gemälde kaum möglich wäre, irgendwelche Elemente zu vertauschen (durch einen Farbtausch zweier Stellen im Gemälde der Mona Lisa bekäme diese möglicherweise rote Augen), ist hier eine große Anzahl vergleichbarer Varianten denkbar mit der Konsequenz eines hohen Zahlenwerts für die Entropie.

Bild 7 Anthony Huber, “Entropy IVa”, Abstract Constructionism Series, 2014. Aus: Marcolli (2015).

5.3.2 Arnheim (1979) sieht in der Kunst eine maßvolle Erhöhung der Entropie nicht negativ, sondern eine Möglichkeit, kreativ zu sein. Er weist auch auf die Beziehung zwischen Entropie, Gleichgewicht und Ordnung hin:

„Die Physiker sind sich natürlich dessen bewusst, dass ein Zuwachs an Entropie häufig zu einem Gleichgewichtszustande führt. [...] Nun ist aber Gleichgewicht das genaue Gegenteil von Unordnung. [...] Das bedeutet aber, dass das Maximum an Entropie, das in einem solchen System durch Umgruppierung erreicht werden kann, durch die bestmögliche Ordnung zustande kommt. [Zitiert von Zubarik (2005)].

Er bringt auch das Beispiel, in dem eine möglichst gleichmäßige Verteilung (von Spielkarten) und damit eine hohe Vielfalt durch die Wahl eines bestimmten Zwecks zu einer neuen Ordnung wird (Zubarik 2005):

„Die durch das Mischen angestrebte Zufallsverteilung soll also die verschiedenen Kartensorten im ganzen Spiel gleichmäßig vorkommen lassen. Diese Gleichmäßigkeit ist die Ordnung, auf die das Mischen abzielt.“

5.4 Entropie in den Sozialwissenschaften

Brunner (1997) formuliert die Funktion von Strukturen in der *Gesellschaft* in der Form:

„Soziale Entropie bedeutet die Auflösung von Strukturen, je geringer der soziale Zusammenhalt, desto größer die soziale Entropie.“ Siehe auch NN 10.

5.5 Die **industrielle Produktion** ist nach Kümmel (2016) gekennzeichnet eine Erhöhung der Entropie, bedingt durch Temperaturgradienten, die einen Wärmefluss ermöglichen, und außerdem durch Partikelströme.

5.6 Vermögensverteilung. Banerjee und Yakovenko (2010) postulieren, dass das Geld in der Wirtschaft demselben Gesetz der Entropiemaximierung folgt wie die Verteilung von Molekülen auf unterschiedliche Energieniveaus. Es ist auf die Teilnehmer des Wirtschaftssystems nach einem Exponentialgesetz verteilt: Wenige besitzen viel und viele wenig. Einem konstanten Energiebetrag entspricht hier eine begrenzte Geldmenge, eine Geld-Temperatur T wird definiert als die Geldmenge pro Person und ein chemisches Potenzial als eine monoton fallende Funktion von T.

5.7 Psychologische Entropie: Karl Hosang (NN 11) betrachtet *„Menschliche Entropie und Kreativität“:*

„Lebende Organismen sind offene Systeme: sie nehmen Energie (und Informationen) aus ihrer Umgebung auf und nutzen diese Energie für ihre internen Bedürfnisse und ihre Selbstorganisation. Dabei minimieren sie die eigene Entropie und geben Entropie an ihre Umgebung ab. Die reduzierte, interne Entropie wird manchmal auch Negentropie genannt.“

Kreativität wird hier als die Fähigkeit interpretiert, Reize auf neuartige Art und Weise zu verarbeiten und dabei auch neue Verhaltensweisen zu entwickeln. Da der Mensch als lebendiges System in seiner Selbstorganisation die innere Entropie verringert, greift er dabei auf seine Kreativität zurück, *um die Entropie so gering wie möglich werden zu lassen* und probiert dafür interne und externe Verhaltensweisen aus.

6. Zusammenfassung

Der physikalische Begriff Entropie ist ein logarithmisches Maß für eine Vielfalt von Anordnungsmöglichkeiten von Molekülen eines idealen Gases, die keine Kräfte aufeinander

ausüben. Unordnung bezieht sich auf von Menschen gesetzte Kriterien und wird ebenfalls als eine Vielfalt verstanden. Auch der Begriff der „gleichwertigen Zustände“ (Mikrozustände) sowie ihre Zusammenfassung zu einem Makrozustand lassen sich auf den Unordnungsbegriff übertragen. Unterschiedlich sind jedoch die Kriterien, an denen die Vielfalt gemessen wird. Während die Entropie im physikalischen Sinn nur ein Maß für die Anzahl der gleich aussehenden räumlichen Verteilungsmuster ist, haben Ordnung und Unordnung für den Menschen eine – oft auch subjektive – Bedeutung. Ordnung orientiert sich an der Zweckmäßigkeit einer Kombination von Elementen, die gemeinsam eine bestimmte Funktion erfüllen, alle anderen Kombinationen gelten als ungeordnet. Makrozustände, die einer Unordnung entsprechen, umfassen in der Regel eine deutlich größere Zahl von Mikrozuständen und weisen damit eine größere Vielfalt und eine höhere Entropie auf. Da eine zufällige Veränderung eines Systems meist zu einer großen Zahl von ungeordneten Kombinationen führt, hat hohe Entropie eine negative Konnotation.

Bei der Entropieüberlegung zu makroskopischen Systemen geht man, wie bei Molekülen, auch von der Vorstellung aus, dass die einzelnen Elemente ständig ihre Position ändern könnten. Das wäre bei einer Bibliothek der Fall, wenn die Bücher nach dem Zufallsprinzip zurückgestellt würden. Das Ausmaß der Unordnung wird dann darüber definiert, wie wenig wahrscheinlich es ist, dass sich aus dem ungeordneten Zustand heraus von selbst Ordnung einstellt. Bei vielen Systemen, wie etwa bei einer Burgruine, werden die Bruchstücke zwar nicht ständig eine neue Anordnung finden, dennoch wird auch hier ein Entropiebegriff definiert aus der denkbaren Vielfalt der möglichen – und fast immer gleich aussehenden – Anordnungen der Steine.

Der Entropiebegriff im Sinn von Unordnung wird in vielen Disziplinen verwendet und oft unterschiedlich assoziiert.

In der Informationstheorie ist Entropie der durchschnittliche Informationsgehalt eines Zeichens aus einem Alphabet sowie die Anzahl der Bits, die man zur Übermittlung dieser Information im Binärcode benötigt.

Im wirtschaftlichen Sektor wird darauf hingewiesen, dass Produktion auf Energieströme angewiesen ist, diese jedoch zwangsläufig zu einer Erhöhung der Gesamtentropie führen. In den Sozialwissenschaften wird Entropie vielfach als Abweichung von der gesellschaftlichen Ordnung interpretiert. Im Bereich von Kunst und Literatur hat Entropie auch eine positive Bedeutung im Zusammenhang mit Kreativität.

Anhang

1. Der historische Entropiebegriff

Entropie nach Boltzmann hat mit der Anzahl der unterschiedlichen Möglichkeiten zu tun, Moleküle in einem Raum zu verteilen (Boltzmann, 2008). Der Begriff wurde schon früher von Clausius (NN 1) geprägt, der feststellte, dass ein Gas, das sich bei einer bestimmten

Temperatur gegen den äußeren Luftdruck reversibel ausdehnt, eine Wärmemenge benötigt, die proportional ist zu dieser Temperatur. Dieses Verhältnis nannte er Entropie. Das war zu einer Zeit, als die Atom- und Molekülvorstellung noch nicht verbreitet war. Es stellte sich heraus, dass dieses Verhältnis einer Entropiedifferenz nach Boltzmann entspricht, nämlich der Differenz der Logarithmen der statistischen Gewichte nach und vor der Ausdehnung. Im Versuch von Clausius beziehen die Moleküle ihre kinetische Energie aus der zugeführten Wärme und vergrößern damit selbst den Raum, über den sie sich dann spontan verteilen können und so einen höheren Entropiezustand erreichen. In beiden Modellen sind Anfangs- und Endzustand gleich: Dieselbe Temperatur, Konzentration der Moleküle auf einen kleinen Raum zu Beginn der Expansion, Ausbreitung über einen größeren Raum am Ende. Um den von Boltzmann aus Wahrscheinlichkeitsüberlegungen abgeleiteten Entropiebegriff in Beziehung zu setzen zur übertragenen Wärmemenge in einer isothermen Expansion, führte Max Planck die Boltzmann-Konstante k ein:

$$S = k \cdot \ln W \qquad \text{[EQ 6]}$$

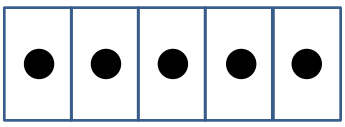
Das S wird in *Joule/Kelvin* angegeben, das k beträgt $1{,}381.10^{-23}$ J/K und lnW ist dimensionslos.

2. Thermodynamik und Informationstheorie. Vergleich der Entropiebegriffe

So wie Moleküle auf einzelne Raumelemente, so kann man auch Wahrscheinlichkeiten auf die Buchstaben eines Alphabets verteilen. H bedeutet den durchschnittlichen Entropiewert eines Buchstabens in bit:

S = lnW; $\quad W = \frac{N!}{n_1!\, n_2!\, n_3!\, n_4!\, n_5!}$ $\qquad \boldsymbol{H = -\sum_{i=1}^{m} p_i \cdot ld\, p_i}$

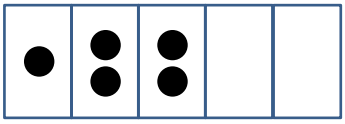
S = 4,79



1/5 A	1/5 B	1/5 C	1/5 D	1/5 E

H = 2,32 bit

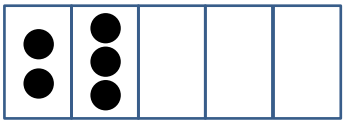
S = 3,40



1/5 A	2/5 B	2/5 C	0 D	0 E

H = 1,52 bit

S = 2,30



2/5 A	3/5 B	0 C	0 D	0 E

H = 0,971 bit

Mit der Gleichmäßigkeit der Verteilung steigen beide Entropiewerte an.

Literatur

Arnheim, R (1979). Entropie und Kunst: Ein Versuch über Unordnung u. Ordnung. (Deutsche Ausgabe von: "Entropy and Art", übersetzt vom Verfasser). Köln: DuMont Buchverlag (dumont taschenbuch 86).

Banerjee, A and Yakovenko, VM (2010). Universal patterns of inequality. *New Journal of Physics, 12* 075032. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/12/7/075032/pdf. Gesehen am 01.06.2022.
https://arxiv.org/abs/0912.4898. Gesehen am 01.06.2022.

Boltzmann, L (2008). Entropie und Wahrscheinlichkeit. Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Band 286. Verlag Harry Deutsch.

Brunner, K-M (1997) Soziale Entropie: Die Natur-Gesellschaft-Differenz am Beispiel thermodynamischer Gesellschaftsmodelle. In K.-S. Rehberg (Hrsg.), Differenz und Integration: die Zukunft moderner Gesellschaften ; Verhandlungen des 28. Kongresses der Deutschen Gesellschaft für Soziologie im Oktober 1996 in Dresden; Band 2: Sektionen, Arbeitsgruppen, Foren, Fedor-Stepun-Tagung (S. 761-765). Opladen: Westdt. Verl. https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-138037. Gesehen am 01.06.2022.

Kümmel, R (2016). The Impact of Entropy Production and Emission Mitigation on Economic Growth. *Entropy*, *18*, 75; https://doi.org/10.3390/e18030075. Gesehen am 01.06.2022.

Marcolli, M (2015). Entropy and Art - the view beyond Arnheim. https://www.its.caltech.edu/~matilde/EntropyArtChapter.pdf. Gesehen am 01.06.2022.

Moeves, G (1995). Die Stadt, die Arbeit und die Entropie. https://www.netzwerk-regionale-baukultur.de/app/download/8301883/Moewes.pdf. Gesehen am 01.06.2022.

NN 1 https://de.wikipedia.org/wiki/Rudolf_Clausius. Gesehen am 01.06.2022.

NN 2 https://de.wikipedia.org/wiki/Umkehrosmose. Gesehen am 01.06.2022.

NN 3 https://de.wikipedia.org/wiki/Gestaltpsychologie. Gesehen am 01.06.2022.

NN 4 https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Wappen_in_Deutschland.
Gesehen am 01.06.2022.

NN 5 https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1_ge/kap_5/backbone/r5_3_2.html.
Gesehen am 01.06.2022.

NN 6 https://de.wikipedia.org/wiki/Glagolitische_Schrift. Gesehen am 01.06.2022.

NN 7 https://de.wikipedia.org/wiki/Buchstabenh%C3%A4ufigkeit.
Gesehen am 01.06.2022.

NN 8 https://en.wikipedia.org/wiki/Gestalt_psychology.
Gesehen am 01.06.2022.

NN 9 https://de.wikipedia.org/wiki/Form_follows_function. Gesehen am 01.06.2022.

NN 10 https://de.wikipedia.org/wiki/Entropie_(Sozialwissenschaften).
Gesehen am 01.06.2022.

NN 11 https://karlhosang.de/kreativitaet-psychologische-entropie/.
Gesehen am 01.06.2022.

Schorre, B (2015). Risiko: System-Entropie.
https://zukunftsarchitekten-podcast.de/2015/10/zas01e06-system-entropie/.
Gesehen am 01.06.2022.

Siefert, H (2016). Ruinen - Architektur & Entropie.
https://www.baunetz.de/campus-masters/Ruinen_-_Architektur_-_Entropie_4763898.html.
Gesehen am 01.06.2022.

Von Ehrenfels, C (1890): Über Gestaltqualitäten. *Vierteljahrsschrift für wissenschaftliche Philosophie,* 14, 249–292.
https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k94141n.image.f254.pagination.
Gesehen am 01.06.2022.

Zubarik, S (2005). Paratexte: Fußnoten und Anmerkungen als textkonstituierende Bestandteile neuerer Erzähllliteratur. Universität Erfurt. Philosophische Fakultät. MA-Studienrichtung Literaturwissenschaft.
https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=Zubarik+2005.
Gesehen am 01.06.2022.