Sonderdruck
aus
AEÜ ARCHIV FÜR ELEKTRONIK UND ÜBERTRAGUNGSTECHNIK
ELECTRONICS AND COMMUNICATION
Band 31 (1977), Seiten 371–374

Informationstheorie und Drucktechnik
Ein informationstheoretisches Gütemaß für Druckprodukte

von Karl R. Scheuter * und Roland Hradezky *

Mitteilung aus dem Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, Technische Hochschule Darmstadt

Herrn Professor Dr.-Ing. E.h. Dr.-Ing. E.h. Karl Küpfmüller zum 80. Geburtstag gewidmet.

Auf der Basis informationstheoretischer Überlegungen wurde in Relation zu einer Druckvorlage eine objektive Druckqualitätsaussage abgeleitet und in psychophysikalischen Experimenten erprobt.

Information Theory and Printing

On the basis of information theory considerations an objective printing quality criterion in relation to an original was derived and was proved in some psychophysical experiments.

1. Ausgangssituation

Ein Produktionsprozeß wird mit der Endkontrolle der gefertigten Artikel abgeschlossen. Eine Kontrolle ist nur dann objektiv und eindeutig möglich, wenn eine Bewertung des Ist-Zustandes durch Vergleich mit vorgegebenen Normen meßtechnisch durchführbar ist. Im Fall eines Reproduktions- und Druckprozesses ist zwar der Soll-Zustand des Druckproduktes durch die Druckvorlage vorgegeben, eine quantitativ bestimmbare Aussage über den Grad der Identität von Soll- und Ist-Zustand ist aber bisher nur beschränkt möglich; vorwiegend subjektiv visuell bedingte Kriterien gelten als ausschlaggebend. Die zur Zeit gebräuchlichen meßtechnischen Verfahren zur Urteilsfindung über die erzielte Druckqualität verwenden Testdruckformen, deren Konzeption Aufschluß über spezifische Verfahrensmängel, nicht aber einen eindeutigen Schluß auf das Druckergebnis selbst zulassen. Die Anwendung dieser Testformen ist etwa vergleichbar mit den in der Nachrichtentechnik gebrauchten Pilot- und Prüfsignalen.

Die Auswertung der Druckergebnisse anhand der Testdruckformen ist nur über den menschlichen Intellekt möglich, so daß eine closed loop-Steuerung des Reproduktions- und Druckprozesses a priori nicht möglich ist. Vor allem auch in Hinsicht auf neue Vervielfältigungsverfahren ist eine Druckqualitätsbeurteilung notwendig, die die visuell relevante Information als Bezug berücksichtigt, da die oben erwähnten Kontrollmöglichkeiten wegen anderssgearteter Technologien nicht anwendbar sind. Außerdem ist ein Trend zu erkennen, Vorlagenmaterial nicht mehr nur über photochemische Prozesse „druckfähig" zu machen, sondern die Vorlageninformation durch Abtastprozesse in elektrische Signale umzuformen (Scanner, Photosatz), die gespeichert, modifiziert und zur Ansteuerung von geeigneten Vervielfältigungssystemen (z. B. Düsensystem beim Ink-Jet Printing) verwendet werden. Eine visuelle Kontrolle der einzelnen Verfahrensschritte ist damit nicht mehr gegeben, so daß auch aus dieser Sicht eine Notwendigkeit zur Entwicklung von neuen, vorwiegend meßtechnisch orientierten Kontrollverfahren abgeleitet werden kann.

Unter dem Korreferat von Prof. K. Küpfmüller wurden am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren der Technischen Hochschule Darmstadt mit Hilfe der Informationstheorie dafür die ersten theoretischen Ansätze gemacht [1]. In einer fortführenden Arbeit wurde die Theorie durch praktische Versuche bestätigt [2].

2. Der Druck- und Reproduktionsprozeß als Informationskanal

Im Bild 1 ist schematisch ein Reproduktions- und Druckprozeß (RDP) gezeigt, der mit der Druckvorlage, den verfahrensbedingten Arbeitsabläufen und dem Druckprodukt als abgeschlossenes System verstanden werden kann. Das beobachtende Element zwischen Vorlage und Druckprodukt ist der Mensch, der über Erfolg oder Mißerfolg des Prozesses entscheidet.

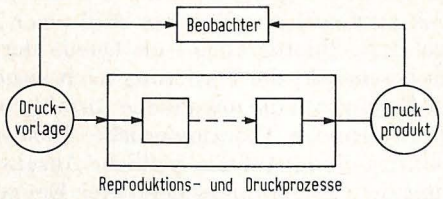

Bild 1. System eines Reproduktions- und Druckprozesses.

Ein ähnliches Modell ist für eine Nachrichtenübertragung bekannt, Bild 2, nur daß der Mensch als Beobachter beispielsweise durch ein Meßinstrument ersetzt werden kann. Damit ist eine objektive Beurteilung der Übertragungsqualität gegeben. In

* Prof. Dipl.-Ing. K. R. Scheuter, Dipl.-Ing. R. Hradezky, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, Technische Hochschule, Alexanderstraße 22, D-6100 Darmstadt.

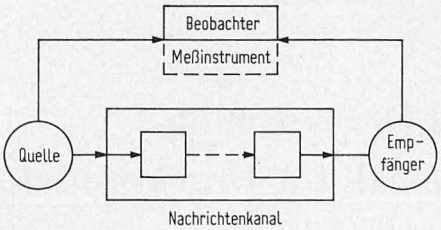

Bild 2. System eines Nachrichtenprozesses.

beiden Fällen werden Informationen übermittelt. Ähnlich wie sich die klassische Nachrichtentechnik mit Kodieren, Übertragen und Dekodieren von elektrisch erzeugten Signalen auseinandersetzt, können aus der Sicht der Informationstheorie in einem RDP auch Signale, nämlich die Dichten oder Farbreize diskreter Bildpunkte, als Informationsträger definiert werden. Diese Signale können aus der Druckvorlage und dem Druckprodukt durch einen Scanprozeß ermittelt, gespeichert und in einem Rechner statistisch aufbereitet werden.

Die Möglichkeit einer quantitativen Beschreibung eines Reproduktions- und Druckprozesses mit Hilfe der Informationstheorie bedingt ein Maß für den Informationsgehalt einer Druckvorlage. Allgemein gilt nach Shannon [3] als Maß der Information I (Informationsgehalt)

$$I(x_i) = -\operatorname{ld} p(x_i) \quad \text{bit}. \tag{1}$$

Diese Definition sagt aus, daß einem Ereignis x_i mit der Wahrscheinlichkeit $p(x_i)$ ein Informationsgehalt zugeordnet werden kann. Treten n_x unterschiedliche Ereignisse mit den Wahrscheinlichkeiten $p(x_i)_{i=1,\,n_x}$ auf, läßt sich durch den Erwartungswert

$$H(x) = -\sum_{i=1}^{n_x} p(x_i) \operatorname{ld} p(x_i) \quad \text{bit/Ereignis} \tag{2}$$

angeben, wieviel ja-nein-Entscheidungen (= 1 bit) im Durchschnitt getroffen werden müssen, um aus n_x verschiedenen Ereignissen ein bestimmtes (z.B. x_3), für den Beobachter relevantes und interessantes Ereignis auszuwählen. Für den Fall einer Druckvorlage (z.B. Photographie) als Quelle der Information beschränkt die Forderung nach visuell relevanten Ereignissen die unendliche Anzahl von möglichen Ereignissen (kontinuierliche Dichte- oder Farbreizverteilung) auf eine endliche Anzahl gerade noch mit dem Auge unterscheidbarer Ereignisse.

Die mögliche Detailauflösung, die durch das geometrische Auflösungsvermögen des Auges begrenzt ist, bestimmt die Ortsfrequenz und damit die Bildpunktzahl N pro Flächeneinheit. Durch die visuell mögliche Kontrastauflösung, die wiederum von der Detailgröße abhängig ist, wird die Amplitudenquantisierung und damit der maximale Entscheidungsgehalt

$$H_{\max}(x) = -\operatorname{ld} n_x \quad \text{bit/Ereignis}$$

festgelegt (Bild 3).

Nach [4] können für das Augauflösungsvermögen eine Rasterteilung von etwa 55 Linien/cm ($N = 3000$ Punkte/cm²) und eine Anzahl von 60 bis 70 Helligkeitsstufen (etwa 6 bit für unbunte Bilder) als Kriterien für die untere Grenze gerade nicht mehr visuell trennbarer Bilddetails angenommen werden. Damit ergibt sich eine maximale Informationsdichte von etwa $1{,}8 \cdot 10^4$ bit/cm².

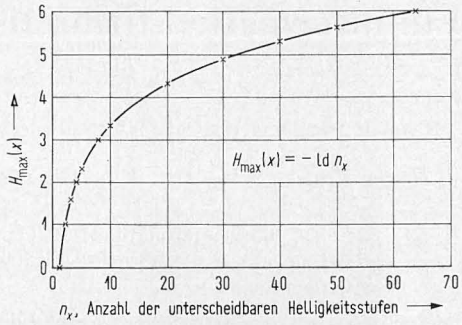

Bild 3. Maximaler Entscheidungsgehalt als Funktion der unterscheidbaren Helligkeitsstufen.

Im Gegensatz zur seriellen Übertragung der Signale in der Nachrichtentechnik wird beim RDP, zumindest im Fall photochemischer Prozesse, die gesamte in der Vorlage enthaltene Information parallel übertragen. Damit ist die in der Nachrichtentechnik praktizierte Redundanzreduktion, die bei gegebener Kanalkapazität beispielsweise eine Erhöhung der pro Zeiteinheit übertragbaren Bilder zum Ziel hat, für einen RDP nicht angebracht. Aus diesem Grund ist eine Berücksichtigung von statistischen Abhängigkeiten benachbarter Bildpunkte und damit die Einbeziehung von Bindungen (Symbolaggregate) bei der Berechnung des Informationsgehaltes nicht erforderlich.

Nach Gl. (2) ist der Informationsgehalt der Druckvorlage mit $H(x)$ und der des Druckes mit $H(y)$ definiert. $H(x)$ und $H(y)$ sind gleich, wenn auch die Wahrscheinlichkeitsverteilungen $p(x_i)$ und $p(y_j)$ (mit $j = 1, n_y$) identisch sind. Eine Identität von Vorlage und Druck liegt aber erst dann vor, wenn die bedingten Wahrscheinlichkeiten $p(y_j/x_i)$ den Wert $p(y_j/x_i) = 1$ für $i = j$ und $p(y_j/x_i) = 0$ für $i \neq j$ haben, d.h., wenn alle Ereignisse in der Vorlage mit gleicher Ortsfrequenz und gleicher Amplitude im Druck reproduziert sind.

Im Normalfall wird der Übertragungskanal, also das drucktechnische System, nicht störungsfrei arbeiten, so daß gilt

$$H(x) \neq H(y)\,, \qquad p(x_i) \neq p(y_i)\,,$$
$$0 \leqq p(y_j \mid x_i) \leqq 1\,.$$

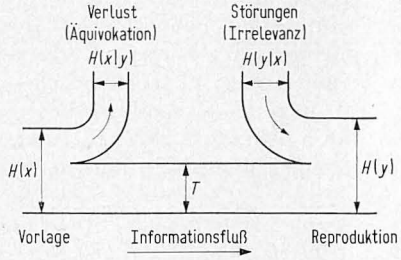

Bild 4. Das Bergersche Diagramm als Modell eines Übertragungskanals.

Das Bergersche Diagramm [1] (Bild 4) zeigt anschaulich das Modell eines solchen Übertragungskanals, in dem die Eingangsinformation $H(x)$, repräsentiert durch die Druckvorlage, nur zum Teil durch die Transinformation T in der Ausgangsinformation $H(y)$, dem Druckprodukt, erhalten bleibt. Die Äquivokation $H(x|y)$ und Irrelevanz $H(y|x)$ kennzeichnen die Anteile an Verlusten bzw. Störungen bei der Informationsübertragung.

Für die im Bergerschen Diagramm enthaltenen Größen gelten die Zusammenhänge

$$H(x) = -\sum_{i}^{n_x} p(x_i)\,\mathrm{ld}\,p(x_i) \qquad \text{bit/Ereignis}$$

$$H(y) = -\sum_{j}^{n_y} p(y_j)\,\mathrm{ld}\,p(y_j) \qquad \text{bit/Ereignis}$$

$$T = -\sum_{i}^{n_x}\sum_{j}^{n_y} p(x_i, y_j)\,\mathrm{ld}\,\frac{p(y_j)}{p(y_j|x_i)} \qquad \text{bit/Ereignis}$$

$$H(y|x) = -\sum\sum p(x_i, y_j)\,\mathrm{ld}\,p(y_j|x_i) = H(y) - T \qquad \text{bit/Ereignis}$$

$$H(x|y) = -\sum\sum p(x_i, y_j)\,\mathrm{ld}\,p(x_i|y_j) = H(x) - T \qquad \text{bit/Ereignis}.$$

Den angeführten Wahrscheinlichkeiten entsprechen angenähert die relativen Häufigkeiten, die durch Sortieren und Ordnen der bildbestimmenden Ereignisse gewonnen werden können.

3. Bewertung der Druckqualität

Auf der Basis der geschilderten informationstheoretischen Überlegungen wurde in [1] ein Gütegrad q

$$q = \frac{T}{H(x) + H(y|x)} = \frac{T}{H(y) + H(x|y)}$$

definiert, der auch als Wirkungsgrad für eine Informationsübertragung verstanden werden kann.

Geht man von der Forderung aus, daß ein RDP eine Druckvorlage möglichst identisch vervielfältigen soll (in der Praxis noch nicht obligatorisch), kann mit q eine in Relation zur Vorlage objektive Druckqualitätsaussage gemacht werden.

Das in Beziehung zur Vorlage ermittelte Qualitätsmaß q für die Übertragungstreue läßt sich nicht nur für den gesamten Reproduktions- und Druckprozeß ermitteln, sondern auch für seine Teilprozesse, wie z. B. Vorlage-Halbtonnegativ oder Halbtonnegativ-Rasterpositiv. Bei aufeinander folgenden Teilprozessen ist die Ausgangsinformation des vorhergehenden Prozesses identisch mit der Eingangsinformation des folgenden (Bild 5). Damit sind zwangsläufig Informationsträgerwechsel (z. B. Papier-Film) und Umcodierungen (z. B. Positiv-Negativ) verbunden, die aber den durch Gl. (2) definierten Informationsbegriff nicht beeinflussen.

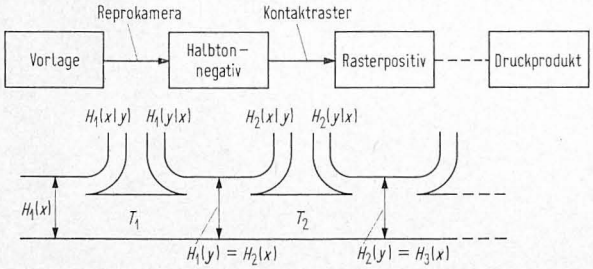

Bild 5. Der Reproduktions- und Druckprozeß als Systemkaskade.

Diese Zerlegung des Gesamtprozesses macht es möglich, jeden Teilprozeß auf seinen informationstheoretischen Wirkungsgrad hin zu untersuchen. Die Prozeßglieder, die entscheidend auf das Ergebnis des Gesamtprozesses Einfluß haben, werden erkennbar. Damit ist eine gezielte Untersuchung und Verbesserung kritischer Teilprozesse möglich. Indirekt ist damit also auch eine objektive Bewertung der am Prozeß beteiligten Apparate, Maschinen, Materialien und Chemikalien gegeben.

Endgültige Bedeutung gewinnen die vorstehenden Überlegungen, wenn der Nachweis erbracht werden kann, daß der theoretisch abgeleitete Gütegrad q mit der subjektiven Qualitätsbeurteilung eines Normalbeobachters übereinstimmt.

Die Grundlage dieses Nachweises ist eine genügende Anzahl psychophysischer Experimente, die im Grenzfall den gesamten Bereich der ein- und mehrfarbigen Reproduktions- und Druckprozesse einbeziehen. Eines der Experimente und seine Ergebnisse werden im folgenden beschrieben [2].

Von einem Schwarz-Weiß-Photo als Druckvorlage (Porträt einer Dame, 9×13 cm) wurden mehrere Drucke von unterschiedlicher Qualität hergestellt.

Die Vorlage und die aus ihr resultierenden Drucke wurden von einem Scanner mit etwa 30 Linien/cm abgetastet. Die Meßwerte, Dichten von Bildpunkten in der Größe von 0,136 mm², wurden auf Band gespeichert. Jedes Bild wurde durch etwa 100000 Meßwerte erfaßt. Die Auswertung dieser Meßwerte im Computer nach den im Abschnitt 2 angedeuteten Prinzipien führte für jeden der Testdrucke zu einem q-Wert, also zu einer Druckgütebeurteilung in Beziehung zur Vorlage. Damit war eine objektive Qualitätsreihenfolge gegeben.

Die entsprechende Reihenfolge auf Grund einer subjektiven Qualitätseinschätzung kann mit Hilfe des „Paarweisen Vergleichs" [5] ermittelt werden. Die Testdrucke wurden in Serien zu $n_R = 6$ bis 8 Bilder aufgeteilt. Der Vergleich wurde von 73 Testpersonen (52 Fachleute und 21 Laien) durchgeführt. Jede Testperson mußte jedes Bild einer Serie mit jedem Bild derselben Serie und mit der Vorlage vergleichen. Bevorzugungskriterium war die vermeintlich bessere Übereinstimmung eines Paarlings mit der Vorlage. Läßt man ein Unentschieden in den Urteilen nicht zu, erhält man für jede Serie eine Matrix mit den binären Entscheidungen 0 oder 1. Die Testbilder können nun entsprechend der Häufigkeit, mit der sie anderen Bildern derselben Serie vorgezogen wurden, in eine Rangfolge gebracht werden.

Die Aufstellung von Rangfolgen der subjektiv empfundenen Druckqualität aus den Werten für die Häufigkeiten der Bevorzugungen ist zulässig, wenn die Urteilssicherheit jeder einzelnen Testperson, eine

genügende Übereinstimmung in den Urteilen der Testpersonen unter sich und auch subjektiv erkennbare Unterschiede zwischen den Testobjekten nachgewiesen werden können. Mit den Prüfmethoden der Statistik des „Paarweisen Vergleichs" konnte der Nachweis erbracht werden.

Es ist nun möglich, die Übereinstimmung dieser Qualitätsreihenfolgen mit den Rangfolgen zu prüfen, die das Ergebnis der informationstheoretischen Betrachtungen waren. An zwei von insgesamt 15 Versuchen, Bild 6, wird eine solche Gegenüberstellung der beiden Rangfolgen gezeigt.

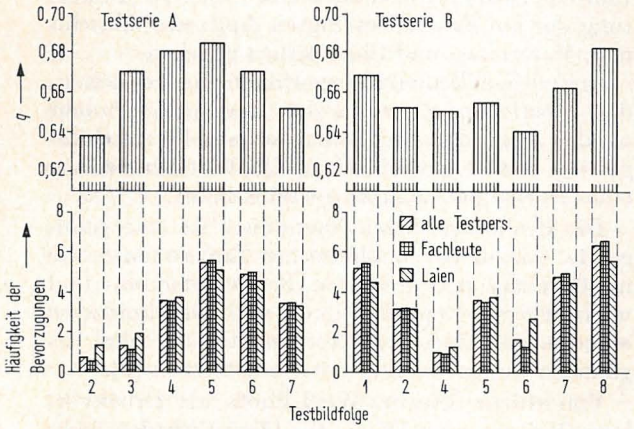

Bild 6. Gegenüberstellung von visueller und informationstheoretischer Qualitätsbeurteilung (Testserien A und B).

In beiden Fällen ist eine Übereinstimmung schon durch den visuellen Vergleich gegeben. Die Aussagekraft dieses Eindrucks muß jedoch durch einen statistischen Test gesichert werden.

Die Güte der Korrespondenz wird durch einen Rangkorrelationskoeffizient r_s definiert. Bei zwei gleichen Rangordnungen wird $r_s = 1$. Wenn eine Rangordnung die Umkehrung der anderen ist, also vollständige Diskrepanz besteht, erhält man $r_s = -1$.

Mit dem Ausdruck $\beta = F(n_r, r_s)$ kann nachgeprüft werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit β eine positive Korrelation zwischen den beiden Rangfolgen angenommen werden kann. In Tabelle 1 sind r_s und β für verschiedene Personengruppen aufgeführt.

Mit diesen Ergebnissen ist eine Korrelation belegt. Damit ist auch eine Übereinstimmung der Qualitätsbewertung auf der Basis informationstheoretischer Überlegungen mit der Qualitätseinschätzung auf Grund visuell subjektiver Betrachtung gezeigt. Weitere Experimente haben dieses Ergebnis bestätigt.

Tabelle 1. Korrelationskoeffizienten r_s und Signifikanzwerte β als Maß für die Güte der Korrelation von visueller und informationstheoretischer Druckqualitätsbeurteilung.

	Testserie A			Testserie B		
	alle	Fachleute	Laien	alle	Fachleute	Laien
r_s	0,8	0,8	0,8	0,96	0,96	0,93
β	0,957	0,957	0,957	0,999	0,999	0,995

Einschränkend muß festgestellt werden, daß der vorliegende Beweis vorerst nur für unbunte Druckvorlagen erbracht wurde. Es kann jedoch angenommen werden, daß für bunte Bilder ähnliche Ergebnisse gezeigt werden können.

4. Zusammenfassung

Der Versuch, die Informationstheorie auf die Drucktechnik anzuwenden, hat zur Definition einer objektiven Güteziffer zur Beurteilung von Druckprodukten geführt, deren Übereinstimmung mit einer subjektiven Beurteilung vorerst für den Bereich unbunter Vorlagen gezeigt werden konnte.

Mit der Güteziffer q kann nicht nur das Ergebnis des Gesamtprozesses, nämlich das Druckprodukt, in eine qualitätsbestimmende Relation zur Druckvorlage gebracht werden, sondern alle Zwischenschritte eines Druckverfahrens können in gleicher Weise analysiert werden.

(Eingegangen am 8. Februar 1977.)

Schrifttum

[1] Wolf, K., Beitrag zur Systemtheorie der Druckverfahren. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1970.

[2] Scheuter, K. R. und Hradezky, R., Print quality and information theory. IARIGAI, 13th Internat. Conference, Wildhaus/Schweiz, 1975.

[3] Shannon, C. E. und Weaver, W., A mathematical theory of communication. University of Illinois Press, Urbana, Ill., 1964.

[4] Schobert, H., Das Sehen, Band 2, S. 293. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1964.

[5] David, H. A., The method of paired comparisons. Griffin's Statistical Monographs and Courses, No. 12. Ch. Griffin & Co., London 1963.