

# Die Sicherheit der Farbübertragung bei kleinsten Bildpunkten im Offsetdruck

Scheuter, Karl R.; Gölling, Sibylle  
(1986)

DOI (TUprints): <https://doi.org/10.25534/tuprints-00014035>

License:



CC-BY 4.0 International - Creative Commons, Attribution

Publication type: Report

Division: 16 Department of Mechanical Engineering  
16 Department of Mechanical Engineering

Original source: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/14035>

---

Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren  
der Technischen Hochschule Darmstadt

Institutsdirektor: Prof. Dipl.-Ing. Karl R. Scheuter

Die Sicherheit der Farbübertragung  
bei kleinsten Bildpunkten im Offsetdruck

von

Karl R. Scheuter und Sibylle Gölling

Darmstadt 1986

Institutsbericht 2/1986

## 1. Problemstellung

Der Druckprozeß, ausgehend von einer Vorlage und endigend mit der gedruckten Reproduktion, ist ein Prozeß der Informationsübertragung und unterliegt den Gesetzmäßigkeiten der Informationstheorie. Auf Grund dieser Gesetzmäßigkeiten war es möglich, eine objektive, meßtechnische Beurteilungsmethode der Druckqualität zu entwickeln und den Beweis zu erbringen, daß die objektive Beurteilung mit der subjektiven Beurteilung übereinstimmt /1, 2/. Andererseits ist es auch möglich, aus der Informationstheorie Kriterien für die Reproduktionsverfahren abzuleiten, welche erfüllt sein müssen, wenn die Druckqualität signifikant erhöht werden soll. Die Einsicht, daß dies für die Zukunftssicherung der Drucktechnik von großer Bedeutung sein wird, ist zwar noch nicht Allgemeingut der Druckindustrie und ihrer Kunden, gewinnt aber täglich neuen Boden.

Grundsätzlich müßte der zur Übertragung der Information von der Vorlage in die Reproduktion gewählte Prozeß in der Lage sein, die Vorlage mindestens so gut zu reproduzieren, daß zwischen Reproduktion und Vorlage kein störender Unterschied mehr feststellbar ist, die Reproduktion und die Vorlage also visuell austauschbar werden. Daraus ergibt sich die Mindestforderung, daß die Kapazität des Prozesses, Information darzustellen, mindestens gleich der Kapazität des Sehsinnes, Information aufzunehmen, sein muß. Bedenkt man jedoch die Tatsache, daß bei jeder Informationsübertragung als Folge des Prozeßrauschens einerseits und als Folge des Bildaufbaues andererseits irrelevante Information - bei der Autotypie z.B. zählen die unvermeidlichen Rosetten beim Mehrfarbendruck dazu - entstehen kann, welche einen Teil der Informationskapazität nutzlos beansprucht, dann reicht die gestellte Forderung nicht aus. Um das gesteckte Ziel für jede beliebige Vorlage sicher erreichen zu können, ist es deshalb notwendig und sinnvoll, die höhere Forderung zu stellen, daß die Informationskapazität des Prozesses die Informationskapazität der Vorlage, welche im Fall der photographischen Vorlage immer höher als die Informationskapazität des Sehsinnes ist, mindestens annähernd erreicht.

Die Informationskapazität in bit/Flächeneinheit ist definiert als

$$H_{\max} = N \cdot \lg Z \quad (1)$$

Dabei ist  $Z$  die Anzahl der unterscheidbaren Informationsereignisse. Bei bunten Bildern handelt es sich dabei immer um unterscheidbare Farbvalenzen und bei unbunten Bildern um unterscheidbare Helligkeiten, unabhängig davon, wie diese erzeugt werden. Die Zahl  $N$  entspricht der Anzahl der je Flächeneinheit vorhandenen Speicherplätze für die Informationsereignisse. Im Reproduktionsprozeß ist jeder Speicherplatz identisch mit einem der Rasterquadrate, in die die Vorlage zur Informationsübertragung zerlegt wird. Mit der Abtastfrequenz  $rz_a$  ist deshalb

$$N = rz_a^2 \quad (2)$$

Damit kann für die Informationskapazität auch

$$H_{\max} = rz_a^2 \cdot \lg Z \quad (1.1)$$

geschrieben werden.

Um die Zusammenhänge leichter verständlich zu machen, wird im folgenden die Tatsache benutzt, daß bei der Reproduktion einer bunten Vorlage der Gesamtprozeß zunächst in drei parallel verlaufende unbunte Reproduktionsprozesse zerlegt wird. Das Übertragungsvermögen des Gesamtprozesses ist nur dann maximal, wenn auch die Teilprozesse die maximale Informationsmenge übertragen können. Im folgenden wird daher nur der unbunte Reproduktionsprozeß, der hinsichtlich seiner Informationsübertragungsfähigkeit auch für den Mehrfarbendruck aussagefähig ist, analysiert.

Die Gleichung (1.1) zeigt, daß es zwei Möglichkeiten gibt, die Forderung nach einem gewünschten Wert der Informationskapazität  $H_{\max}$  zu erfüllen. Es darf die Zahl  $Z$  der unterscheidbaren Informationsereignisse klein sein, wenn die Bildauflösung, d.h. die Abtastfrequenz  $rz_a$  ausreichend groß gehalten wird. Umgekehrt darf die Abtastfrequenz  $rz_a$  klein sein, wenn die Zahl  $Z$  der unterscheidbaren Ereignisse ausreichend groß gehalten wird. Um zu entscheiden, welche der

beiden Vorgehensweisen oder welcher Kompromiß zur höchst nutzbaren Informationskapazität und damit einhergehend zur höchsten Druckqualität führt, muß die Physiologie des Sehsinnes herangezogen werden. Diese stellt drei Grundforderungen an das Bildübertragungsverfahren /3/.

Erstens muß die Abtastfrequenz  $rz_a$  größer sein als das bei  $rz_{vis} \approx 100$  L/cm liegende örtliche Auflösungsvermögen des Auges, damit alle visuell in der Vorlage erkennbaren Details auch in der Reproduktion wieder erkennbar sind.

Zweitens muß die Zahl  $Z$  der in der Reproduktion unterscheidbaren Ereignisse, entsprechend den Helligkeitsstufen im Farbauszug, umso größer werden, je größer die dargestellten Details, als Flächen gleichen Tonwertes verstanden, sind. In diesem Grenzfall sollte  $100 < Z < 200$  angestrebt werden. Bei Details, welche vom Auge nur gerade noch auflösbar sind, darf  $Z$  jedoch um vieles kleiner sein.

Drittens muß der relative theoretische Helligkeitsumfang, der mittels den vom Bildaufbau vorgegebenen kleinsten und größten Farbflächenanteilen im Druck in guter Näherung zu

$$\Delta B_{rel} = \Psi_{max} - \Psi_{min} \quad (3)$$

definiert werden kann, gegen 1 streben:

$$\Delta B_{rel} \rightarrow 1$$

Im unbunten Druck bzw. in einem Farbauszug setzt sich jedes Informationsereignis aus bestimmten Grundbausteinen zusammen. Es kann sich dabei z.B. um ein Pigment, ein photographisches Korn oder einen Druckpunkt handeln. Die Informationsereignisse werden dann durch die unterschiedliche Anzahl der in einem Informationsereignis enthaltenen Grundbausteine unterscheidbar. Es läßt sich nun immer eine Elementarzelle finden, deren Abmessungen gerade denen eines Grundbausteines entsprechen. Die Kantenlänge  $d_0$  der Elementarzelle kann dann nicht mehr verkleinert werden und es gilt für jede Elementarzelle, daß ein Grundbaustein entweder vorhanden ist oder nicht vorhanden ist. In erster Näherung darf die Fläche dieser Elementarzelle als quadratisch angenommen werden. Dann läßt sich eine belie-

bige Fläche  $A_R$  mit der Kantenlänge  $d_R$  in ganzzahligen Vielfachen der Fläche dieser Elementarzelle beschreiben. Es gilt

$$A_R = d_R^2 = n^2 \cdot d_0^2 \quad (4)$$

Diese Fläche  $A_R$  kann z.B. die Fläche eines der Rasterquadrate sein, in die die Vorlage zur Informationsübertragung zerlegt wird. Jedes Rasterquadrat entspricht einem Speicherplatz für ein Informationsereignis, hier also für einen bestimmten Helligkeitswert. Damit ist die Anzahl der pro Flächeneinheit vorhandenen Speicherplätze für die Informationsereignisse gegeben durch

$$N = r z_a^2 = 1/A_R = 1/(n^2 \cdot d_0^2) \quad (5)$$

Die Anzahl der darin unterscheidbaren Informationsereignisse ist nun abhängig von der Methode des Bildaufbaues. Es existieren zwei grundsätzlich unterschiedliche Arten des Bildaufbaues.

Die eine Methode, entsprechend dem frequenzmodulierten Bildaufbau, ist dadurch gekennzeichnet, daß die Größe einer Elementarzelle identisch mit der Größe des gleichbleibenden Druckpunktes ist, also

$$d_0^2 = d_{DP}^2 = \text{konst.}$$

Für jede Elementarzelle gilt dann, daß sie entweder mit einem Druckpunkt besetzt ist oder nicht besetzt ist. In diesem Fall gilt für die Anzahl der in der Fläche  $A_R$  unterscheidbaren Informationsereignisse

$$Z_{FM} = n^2 + 1 \quad (6)$$

Die Informationskapazität einer frequenzmoduliert aufgebauten Reproduktion ist dann mit den Gleichungen (1), (5) und (6) gegeben durch

$$H_{\max FM} = \frac{1}{n^2 \cdot d_{DP}^2} \cdot \lg(n^2 + 1) \quad (7)$$

Die Informationskapazität und damit einhergehend die Druckqualität einer frequenzmoduliert aufgebauten Reproduktion  $H_{\max FM}$  hängt außer vom Druckpunktdurchmesser  $d_{DP}$  noch von  $n^2$ , also von der Anzahl Druckpunkte pro Abtastrasterquadrat, ab. Die Anzahl  $n$  kann minimal 1, ansonsten aber beliebig groß werden. Die Funktion  $H_{\max FM}$  ist für  $n > 1$  monoton fallend. Für  $n > 1$  ist der Funktionswert auf jeden Fall geringer als derjenige für  $n = 1$ . Die maximale Informationskapazität einer frequenzmoduliert aufgebauten Reproduktion ist folglich dann erreicht, wenn das Abtastquadrat genauso klein ist wie die Druckpunkte. Bei Ausschöpfung der maximal vorhandenen Informationskapazität ist dann für  $n = 1$

$$H_{\max FMmax} = 1/d_{DP}^2 \quad (8)$$

Da der Druckpunkt entweder vorhanden oder nicht vorhanden sein kann, gilt mit  $\varphi_{\max} = 1$  und  $\varphi_{\min} = 0$  für die relative Helligkeit

$$\Delta B_{rel} = 1$$

Würde bei der Gestaltung des frequenzmodulierten Bildaufbauverfahrens  $n = 1$  endgültig festgelegt, dann würde das bedeuten, daß für den Bildaufbau nur

$$Z_{FM} = n^2 + 1 = 2$$

Helligkeitsstufen, nämlich Vollton und Papierweiß zur Verfügung stehen würden. Das Verfahren muß deshalb so gestaltet werden, daß sich  $n$  selbsttätig den Erfordernissen der Vorlage anpaßt und damit dafür sorgt, daß überall dort, wo feine Tonunterschiede auftreten, der Wert von  $n$  der Physiologie des Sehsinnes entsprechend ausreichend groß wird. Eine relativ einfache und überprüfte, rein rechnerische Vorgehensweise ist in der Literatur /4/ dargestellt. In der allgemeinsten Form ergibt sich dann für die Informationskapazität des frequenzmodulierten Bildaufbaues

$$H_{\max FM} = \frac{1}{n^2 \cdot d_{DP}^2} \cdot \lg(n^2 + 1) \leq H_{\max FMmax} = 1/d_{DP}^2 \quad (9)$$

Da unabhängig von der Größe von  $n$  die Farbflächenanteile  $\varphi_{\min} = 0$  und  $\varphi_{\max} = 1$  sein dürfen, ohne daß im Licht oder in der Tiefe mit Tonwertabrissen gerechnet werden muß /5/, bleibt der relative Helligkeitsumfang

$$\Delta B_{\text{rel}} = 1$$

immer erhalten.

Das Verfahren erfüllt damit die dritte physiologisch bedingte Forderung nach einem hohen Helligkeitsumfang auch.

Da  $n$  vorlagenabhängig und deshalb nicht frei verfügbar ist, gewinnt die Frage nach der Größe des kleinsten technisch realisierbaren Druckpunktdurchmessers eine ausschlaggebende Bedeutung, weil die Informationskapazität und damit einhergehend die Druckqualität mit dem Kehrwert des Durchmesserquadrates des Druckpunktes steigt.

Die andere Methode des Bildaufbaues ist die Amplitudenmodulation, welche dem bisher üblichen autotypischen Bildaufbau entspricht. Dieser ist dadurch gekennzeichnet, daß jedes Informationsereignis ein Rasterpunkt mit bestimmten Abmessungen im zugehörigen Rasterquadrat ist und die Modulation der Helligkeit über die Variation der Punktfläche erfolgt. Die Abstufung kann in Schritten der Größe der Elementarzelle erfolgen. Es gibt jedoch, um Tonwertabrisse im Licht zu vermeiden, einen kleinsten Rasterpunkt, der immer stehen bleiben muß und der, wie beispielsweise beim Laserscanner, selbst aus der Anzahl  $k^2$  von Elementarzellen zusammengesetzt ist. Somit läßt sich für die Fläche des kleinsten Rasterpunktes schreiben

$$A_{\text{RPmin}} = d_{\text{RPmin}}^2 = k^2 \cdot d_0^2 \quad (10)$$

Dadurch entsteht aber zwischen der Helligkeit des unbedruckten Papiers und der diesem kleinsten Rasterpunkt entsprechenden Helligkeit ein  $k^2$ -fach größerer Sprung als zwischen zwei in den Helligkeitswerten aufeinanderfolgenden Druckpunkten. Dieser Helligkeitssprung ist für die Bildmodulation verloren und entspricht einem Dichte-, bzw. einem Farbumfangsverlust beim Mehrfarbendruck.

Zur Vermeidung von Tonwertabrissen in den Tiefen muß auch hier ein Punkt, dieses Mal ein offener, d.h. negativer, stehen bleiben. In erster Näherung darf er als gleichgroß wie der kleinste positive Rasterpunkt genommen werden. Seine Fläche ist demnach

$$A_{\text{RPneg}} = A_{\text{RPmin}} = k^2 \cdot d_0^2 \quad (11)$$

Es entsteht nun ebenfalls zwischen der diesem kleinsten negativen Druckpunkt entsprechenden Helligkeit und derjenigen des vollständig bedruckten Papiere ein  $k^2$ -fach größerer Sprung als zwischen zwei in den Helligkeitswerten aufeinanderfolgenden Druckpunkten. Auch dieser Helligkeitssprung ist für die Bildmodulation verloren und reduziert den Dichteumfang.

Es gilt daher für die Anzahl der unterscheidbaren Ereignisse

$$Z_{\text{AM}} = n^2 + 1 - 2k^2 \quad (12)$$

Für den minimalen Rasterpunktflächenanteil gilt

$$\varphi_{\text{min}} = d_{\text{RPmin}}^2 / A_{\text{R}} = k^2 / n^2 \quad (13)$$

Ferner gilt mit den Gleichungen (5), (10) und (13)

$$r_{z_a}^2 = 1/A_{\text{R}} = 1/(n^2 \cdot d_0^2) = \varphi_{\text{min}} / d_{\text{RPmin}}^2 \quad (14)$$

Gleichung (13) in Gleichung (14) eingesetzt ergibt

$$r_{z_a}^2 = \frac{k^2}{n^2} \cdot \frac{1}{d_{\text{RPmin}}^2} \quad (15)$$

Damit wird die Informationskapazität für den amplitudenmodulierten Bildaufbau

$$H_{\text{maxAM}} = \frac{k^2}{n^2} \cdot \frac{1}{d_{\text{RPmin}}^2} \cdot \lg(n^2 + 1 - 2k^2) \quad (16)$$

Auch hier stellt sich die Frage nach dem Höchstwert der Informationskapazität. Hält man die Größe  $k$  fest und betrachtet die Größe  $n$  als wählbar, dann ergibt sich aus der zu Null gesetzten partiellen Ableitung  $\frac{\partial H}{\partial n}$  die Gleichung

$$\frac{n^2}{n^2 + 1 - 2k^2} - \ln(n^2 + 1 - 2k^2) \stackrel{!}{=} 0 \quad (17)$$

Ihre Auflösung liefert für ein vorgegebenes  $k$  den optimalen Wert von  $n = n_{\text{opt}}(k)$ , bei dem die Informationskapazität einen Maximalwert annimmt. Für die praktische Anwendung muß  $n_{\text{opt}}(k)$  auf den nächstliegenden geradzahligen Wert  $n_{\text{real}}$  gerundet werden. Damit kann nach Gleichung (12) die Anzahl  $Z$  der unterscheidbaren Ereignisse, d.h. Helligkeitsstufen und schließlich auch der relative Helligkeitsumfang berechnet werden. Für letzteren gilt nach Gleichung (3) mit  $\varphi_{\text{max}} = 1 - \frac{k^2}{n^2}$  und  $\varphi_{\text{min}} = \frac{k^2}{n^2}$

$$\Delta B_{\text{rel}} = 1 - 2 \frac{k^2}{n_{\text{real}}^2(k)}$$

In der Tabelle 1 sind für den apparativ günstigen Bereich bis  $n = 12$ , entsprechend 12 Schreibspuren je Rasterquadrat, die Werte für  $H_{\text{maxAMmax}}(k)$ , sowie  $Z$  und  $\Delta B_{\text{rel}}$  in Abhängigkeit von  $k$  zusammengestellt.

$k$	$n_{\text{opt}}(k) \rightarrow n_{\text{real}}$	$H_{\text{maxAMmax}}$	$Z$	$\Delta B_{\text{rel}}$
1	2,14 $\rightarrow$ 2	$0,396/d_{\text{RPmin}}^2$	3	0,5
2	3,77 $\rightarrow$ 4	$0,792/d_{\text{RPmin}}^2$	9	0,5
3	5,35 $\rightarrow$ 5	$1,080/d_{\text{RPmin}}^2$	8	0,28
4	6,92 $\rightarrow$ 7	$1,362/d_{\text{RPmin}}^2$	18	0,35
5	8,48 $\rightarrow$ 8	$1,526/d_{\text{RPmin}}^2$	15	0,22
6	10,03 $\rightarrow$ 10	$1,749/d_{\text{RPmin}}^2$	29	0,28
7	11,58 $\rightarrow$ 12	$1,890/d_{\text{RPmin}}^2$	47	0,32

Tabelle 1 Informationskapazität  $H_{\text{maxAMmax}}$ , Zahl der Helligkeitsstufen  $Z$  und relativer Helligkeitsumfang  $\Delta B_{\text{rel}}$  in Abhängigkeit von  $n_{\text{opt}}(k)$

Zieht man zum Vergleich die maximale Informationskapazität bei frequenzmoduliertem Bildaufbau

$$H_{\max FM\max} = 1/d_{DP}^2$$

heran, wobei  $d_{DP} = d_{RP\min}$  zu setzen ist, dann stellt man fest, daß bei höheren  $k$ -Werten die Informationskapazität bei amplitudenmoduliertem Bildaufbau die Informationskapazität bei frequenzmoduliertem Bildaufbau noch übertreffen könnten.

Es ist jedoch auch erkennbar, daß in diesem Bereich weder die Zahl der unterscheidbaren Helligkeiten noch der relative Helligkeitsumfang der Physiologie des Sehsinnes gerecht werden kann. Den Bereich weiter auszudehnen ist sinnlos, weil bei weitersteigenden Werten von  $k$  und  $n$  der relative Helligkeitwert weiterhin monoton absinkt. Das verhindert endgültig die praktische Anwendung der maximal möglichen Informationskapazität des amplitudenmodulierten Bildaufbaues.

Die einzig derzeit bekannte und technisch realisierbare Möglichkeit, den Mangel der viel zu kleinen Zahl der unterscheidbaren Helligkeitsstufen und des viel zu geringen relativen Helligkeitsumfanges zu steuern, besteht - unter Verzicht auf die maximale Informationskapazität - in der Wahl eines  $k$ - $n$ -Wertepaares, das die physiologischen Forderungen ausreichend gut erfüllt.

Unter diesem Gesichtspunkt erweist sich die Wahl von  $k = 2$  und  $n = 12$  z.Zt. technisch als optimal. Es wird damit die Zahl der unterscheidbaren Ereignisse, d.h. der Helligkeitsstufen zu

$$Z = n^2 + 1 - 2k^2 = 137$$

und der relative Helligkeitsumfang

$$\Delta B_{rel} = 1 - 2 \frac{k^2}{n^2} = 0,944$$

- entsprechend einem 2,8%-Punkt - ausreichend hoch.

Für die Informationskapazität ergibt sich schließlich jedoch nur noch

$$H_{\max AM} (k=2, n=12) = \frac{0,197}{d_{RP\min}^2} \ll H_{\max FM\max}$$

Der Verlauf dieses Wertes in Abhängigkeit vom kleinsten Rasterpunkt ist, zusammen mit dem Verlauf von  $H_{\max FM_{\max}}$ , in Abb. 1 eingetragen. Ferner ist dort der Bereich der Informationskapazitäten photographischer Materialien eingetragen. Es zeigt sich, daß die Informationskapazitäten der höher auflösenden photographischen Materialien sich im frequenzmodulierten Bildaufbau mit Druckpunkten von rund  $8 \mu\text{m}$  bis  $10 \mu\text{m}$  erreichen lassen. Im amplitudenmodulierten Bildaufbau würde dies jedoch kleinste Rasterpunkte von rund  $3 \mu\text{m}$  bis  $4 \mu\text{m}$  verlangen. Die Frage nach der Größe des kleinsten sicher übertragbaren Rasterpunkte ist für den amplitudenmodulierten Bildaufbau ganz offensichtlich von noch viel ausschlaggebenderer Bedeutung.

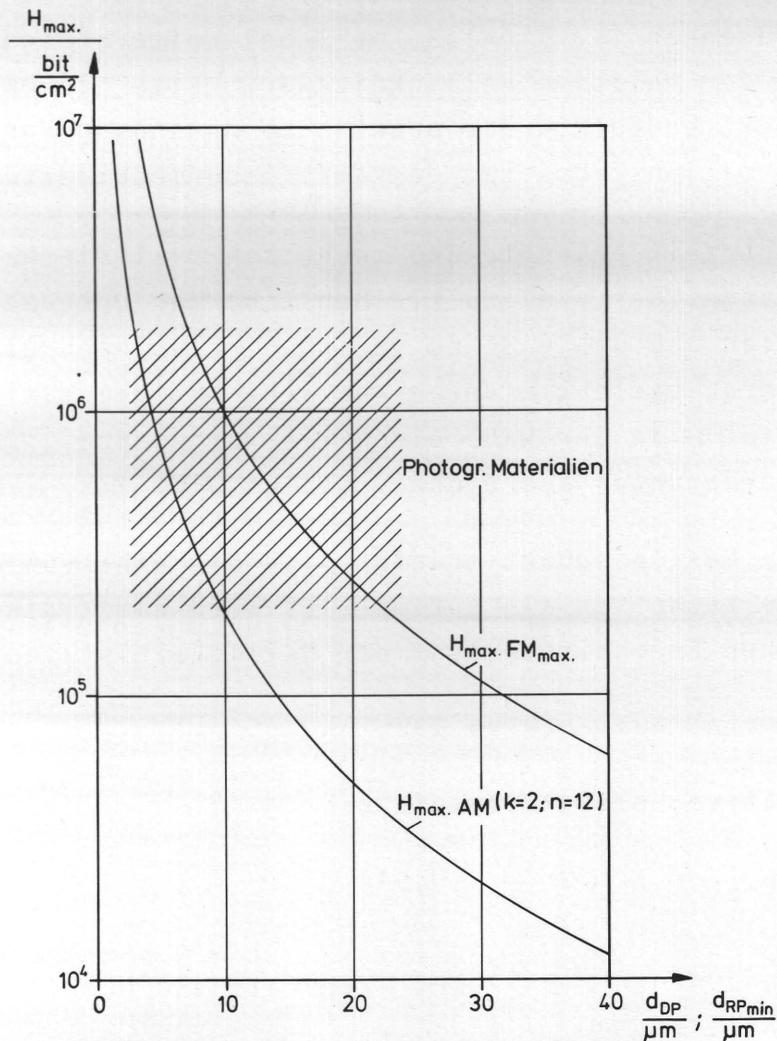


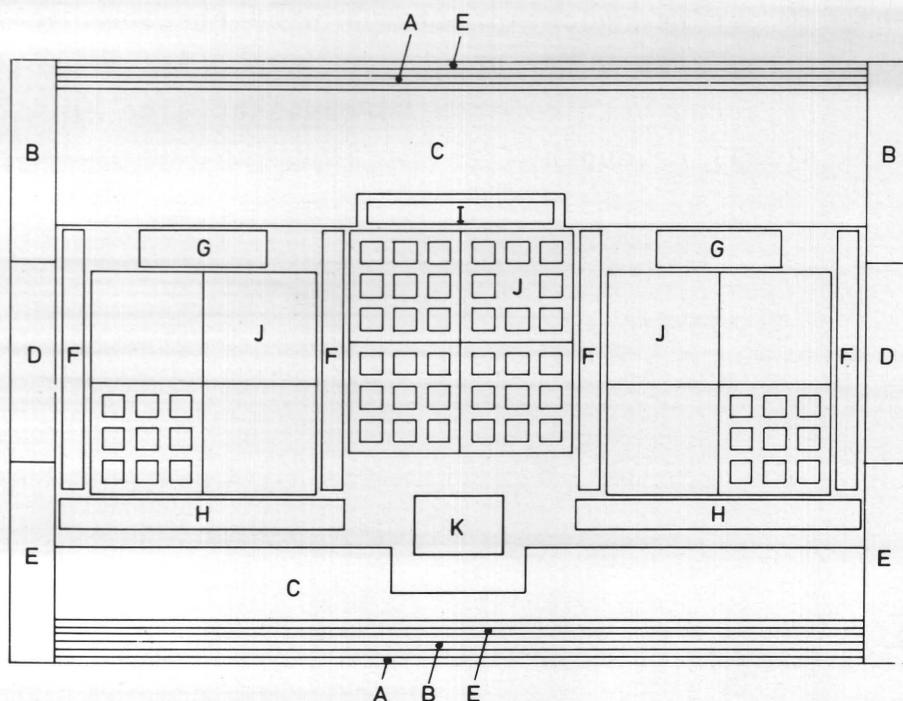
Abb. 1 Verlauf der Informationskapazität in Abhängigkeit von der Druck- bzw. Rasterpunktgröße bei Frequenz- und Amplitudenmodulation

In der Praxis wird in der Regel jedoch davon ausgegangen, daß Strukturen mit Abmessungen unter 20  $\mu\text{m}$ , wie sie hier gefordert werden müssen, drucktechnisch nicht mehr stabil übertragbar seien. Damit stellt sich jedoch die Frage, ob die angenommene Instabilität der Übertragung tatsächlich auf fehlende Farbübertragungssicherheit in der Druckmaschine zurückzuführen ist, oder auf den vorangegangenen Reproprozeß. Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurde daher versucht, die wirklichen Grenzen der Farbübertragungssicherheit für Mikrostrukturen in der Druckmaschine zu finden.

Dazu muß ein Beurteilungskriterium für die Sicherheit der Farbübertragung gefunden werden. Eine stabile Farbübertragung ist dann gewährleistet, wenn die örtlichen Farbvalenzen der Vorlage in der Reproduktion stabil wiedergegeben werden können. Für den unbunten Druck, von dem ersatzweise ausgegangen wurde, bedeutet dies, daß die unterschiedlichen Helligkeitsstufen, so wie das Auge sie sieht, in der Reproduktion stabil wiedergegeben werden müssen. Es bleibt somit zu untersuchen, inwieweit Rasterpunkte mit einem im Litho genau bestimmbareren Durchmesser eine optische Dichte im Druck stabil erzeugen.

## 2. Testdruckform

Zur Feststellung der tatsächlichen Grenzen der Farbübertragung in der Druckmaschine wurde eine Testdruckform entwickelt, in welcher vorgewählte optische Dichtewerte mit verschiedenen Druckpunktgrößen und Rasterfrequenzen wiedergegeben werden. Die Abmessungen der kleinsten Strukturen waren, entsprechend der Grenze des Auflösungsvermögens der heute verwendeten Materialien mit 5 µm Punktdurchmesser vorgegeben. Diese Punktgröße liegt bereits im Bereiche des photographischen Kornes. Wegen der notwendigen Beschränkung des Probenumfanges wurde der größte zur Untersuchung herangezogene Punktdurchmesser mit 40 µm gewählt. Damit werden die Punktgrößen im Lichterbereich der heute üblichen Rasterfrequenzen von 60 bis 80 L/cm noch miterfaßt. Für größere Punktdurchmesser ist das Übertragungsverhalten weitgehend bekannt /6, 7/ und gilt als unproblematisch. Zur



A: Druckkontrollstreifen  
B: 40 % - Rasterfläche  
C: 60 % - Rasterfläche  
D: 80 % - Rasterfläche  
E: Volltonfläche  
F: UGRA - Testkeil

G: FOGRA - PMS I - Kontrollkeil  
H: Volltonfläche mit feinen Linien  
I: Kalle - Rasterkeil  
J: Testelemente aus 36 Probenfeldern  
K: Bild mit feinen Linien

Abb. 2 Testdruckform (schematisch)

Beurteilung der Bildglätte sollten die Testfelder eine Mindestgröße von  $2 \text{ cm}^2$  aufweisen.

Die endgültige Konzeption der Druckform (Abb. 2) zeigt drei Testelemente J (Abb. 3), bestehend aus je 36 Graufeldern.

5/240	7/170	9/120	13/84	19/60	40/30
0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
5/340	7/240	9/170	13/120	19/84	40/42
0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
5/480	7/340	9/240	13/170	19/120	40/60
0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
5/680	7/480	9/340	13/240	19/170	40/85
0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
5/960	7/680	9/480	13/340	19/240	40/120
0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
5/1360	7/960	9/680	13/480	19/340	40/167
0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32

Abb. 3 Testelement (Die Zahlen vor dem Schrägstrich geben die Punktgröße, gerundet auf  $\mu\text{m}$  an, und jene dahinter die Rasterfrequenz in  $\text{L/cm}$ . Die Zahlen in den Quadraten sind die gerundeten Werte der geometrischen Flächendeckung  $\varphi$ ).

Neben diesen Graufeldern enthält die Testdruckform ein Strichbild, Kontrollkeile als Hilfsmittel bei der Kopie und beim Druck, sowie gleichmäßige Rasterflächen zur Erhöhung und gleichmäßigen Verteilung des Farbflusses in Länge und Breite. Die mittlere Flächendeckung der Testdruckform beträgt 35 %.

### 3. Vorlagenherstellung

Die Versuche sollten zeigen, mit welcher Sicherheit ein Druckpunkt mit einem bestimmten Durchmesser in einen entsprechenden optischen Dichtewert übergeht. Bedingung für quantitativ richtige Aussagen sind eindeutig meßbare Strukturen im Original. Diese Bedingung kann mit den Methoden der konventionellen Reprotechnik nicht erfüllt werden. Die dort benutzten Lith- oder Line-Filme lassen auch bei richtiger Belichtung unter günstigen Umständen um den belichteten Punkt eine Grauzone von mindestens 2  $\mu\text{m}$  Breite entstehen /8, 9 /. Bei konventionellen Druckpunktgrößen von z.B. 100  $\mu\text{m}$  Durchmesser führt dies zu Fehlern bei der Durchmesserbestimmung in der Größenordnung von 2 %. Will man jedoch kleinste Strukturen ausmessen, so z.B. die hier interessierenden Punkte mit Durchmessern von 5  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$ , so beträgt die Unsicherheit mindestens 20 % bis 40 %. Da auf diese Weise eine eindeutige Bestimmung der Punktdurchmesser nicht möglich ist, schied die konventionelle Reprotechnik für die Herstellung der Vorlagen aus und es mußte eine anforderungsgerechte Alternative gefunden werden.

Bei der Herstellung von Halbleiter-Chips ist man auf größte Genauigkeiten im Mikrometerbereich angewiesen. Deshalb werden zur Erzielung der geforderten hohen Genauigkeit alle Übertragungsschritte zur Vorlagenherstellung in staubfreien Räumen und unter Einhaltung höchster Sauberkeitsanforderungen durchgeführt. So war es naheliegend, die dort vorhandenen Möglichkeiten der Reproduktionstechnik zur präzisen Vorlagenherstellung zu nutzen. Dem entsprechend wurden Originale in 150-facher Vergrößerung mit einem Photoplotter angefertigt. Derartige Geräte werden heute üblicherweise zur Belichtung der photographischen Vorlagen bei der Leiterplattenherstellung verwendet. Die Punktdurchmesser werden dabei durch die vorhandenen Blenden bestimmt. Die Symbolgenauigkeit, also die Genauigkeit, mit der der Zieldurchmesser erreicht wird, liegt je nach Symbolgröße bei 0,3 % bis 1 %. Die Originale wurden in einer Größe von 15 cm x 15 cm hergestellt.

Im nächsten Schritt wurden diese Originale mit einer exakt justierten Reprokamera, um den Faktor 15 verkleinert, auf photographische

Glasplatten kopiert. Die Glasplatten werden den normalen Filmmaterialien vorgezogen, weil sie sich nicht verziehen können und außerdem eine höhere Oberflächenglätte mit gleichmäßigerer Emulsionsschicht aufweisen. Auf diese Art wird die bestmögliche Abbildung gewährleistet.

Die so entstandenen Zwischenegative dienen dann als Vorlage in einer Stepper-Kamera, deren Beleuchtungseinrichtung hinsichtlich der Ausleuchtung optimiert ist. Durch Verfahren eines durch Schrittmotoren gesteuerten Kreuztisches kann nun das Zwischen negativ in 10-facher Verkleinerung beliebig häufig neben- und untereinander auf photographische Glasplatten reproduziert werden.

Allerdings kann die Schrittweite des Kreuztisches der Kamera nur auf 10  $\mu\text{m}$  genau eingestellt werden. Dies ist für die Belange der Halbleitertechnik ausreichend, da dort ein Zwischen negativ immer eine komplette Schaltung beinhaltet, die dann mit kleinen, aber nicht notwendigerweise exakten Zwischenräumen neben- und untereinander reproduziert wird. Im vorliegenden Fall, wo ja aus einem Zwischen negativ durch Nebeneinanderkopieren ein geschlossenes Probenfeld entstehen sollte, zeigten sich diese Stepperschritte mehr oder weniger ausgeprägt sichtbar. Bei einem Verzicht auf das Steppen hätte jedoch das Original, welches vom Photoplotter erzeugt wird, eine Größe von 225 cm x 225 cm aufweisen müssen, was geräte-technisch nicht realisierbar war. Die gleichmäßigen Raster, die sich auf einigen Probefeldern mit dem bloßen Auge erkennen lassen, sind also auf die Stepper-Kamera zurückzuführen (Abb. 4).

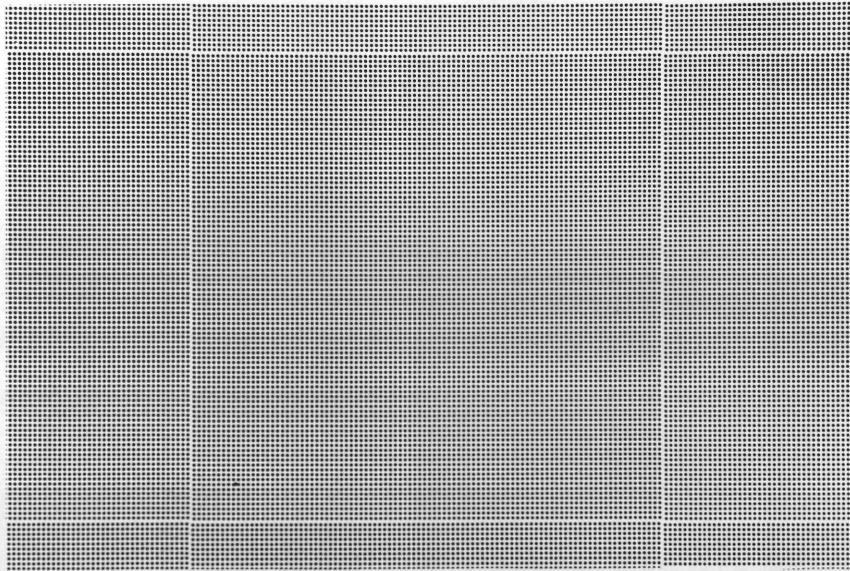


Abb. 4 Stepperschritte in der Vorlage (Punktgröße 7  $\mu\text{m}$ , 65-fach vergrößert)

Abb. 5 zeigt, daß die Randschärfe der auf diese Weise erzeugten Punkte im Vergleich zu konventionell hergestellten Rasterpunkten außerordentlich hoch ist.

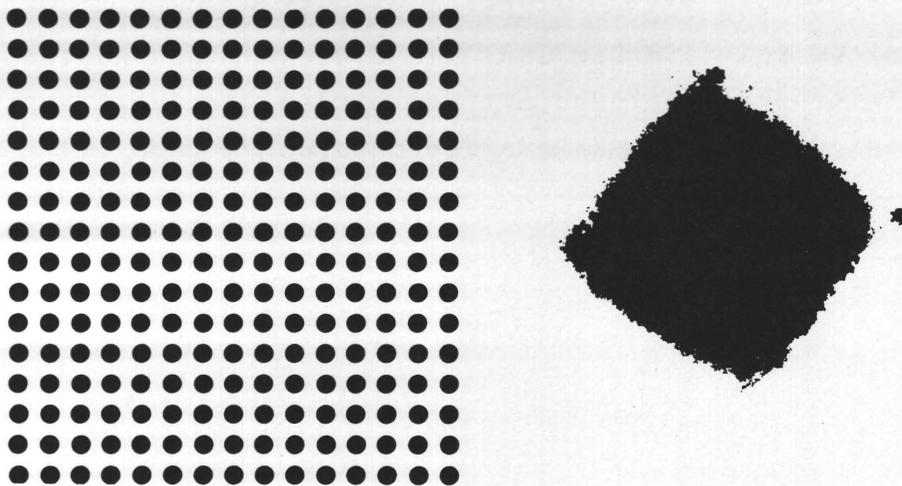


Abb. 5 Abbildungsgenauigkeit, Punktdurchmesser 7  $\mu\text{m}$  bzw. Rasterpunktdurchmesser 80  $\mu\text{m}$  (400-fach vergrößert)

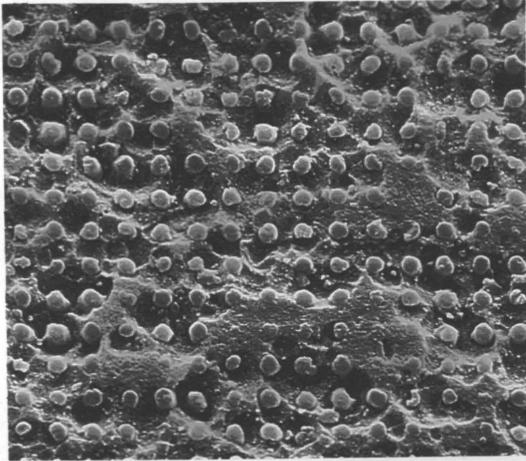
#### 4. Druckplattenkopie

Die konventionelle Druckplattenkopie bietet ebenfalls nicht die Möglichkeit, Mikrostrukturen präzise zu übertragen. Diese Forderung kann nur dann erfüllt werden, wenn die abbildenden Strahlen möglichst parallel einfallen. Bei der geringen Entfernung zwischen Lampe und Beleuchtungsfläche einer üblichen Druckplattenkopiereinrichtung ist jedoch weder eine gleichmäßige Ausleuchtung erreichbar, noch ein auch nur annähernd paralleler Lichteinfall möglich /10/. Daraus folgt, daß kleine Strukturen nicht mehr stabil übertragen werden können, weil sie durch schräg einfallendes Licht unterstrahlt werden. Somit kann das hohe potentielle Auflösungsvermögen, das die photographischen Materialien bieten, wegen ungeeigneter Druckplattenkopierverfahren nicht genutzt werden.

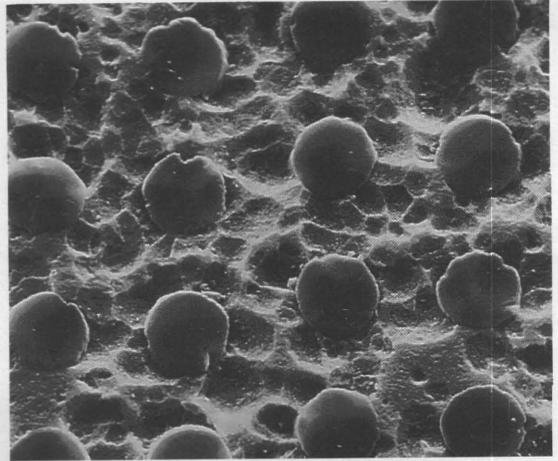
Für das vorliegende Forschungsvorhaben wurde der Kopierprozeß mit einfachen Mitteln verbessert. Zunächst wurde der Lampenabstand vergrößert und als zweites das Licht mit einer sogenannten Lichtfalle parallelisiert. Diese Lichtfalle besteht im einfachsten Fall aus einem innen matt geschwärzten Rohr, in dem der größte Teil der schräg einfallenden Lichtstrahlen absorbiert wird und das zwischen Brenner und Kopierrahmen steht. Der maximale Winkel des schräg einfallenden Lichtes bestimmt sich dann aus dem Verhältnis von Rohrdurchmesser zu Rohrlänge und betrug im vorliegenden Fall  $3,5^{\circ}$ . Mit dieser Einrichtung gelang es ohne Schwierigkeiten, die feinsten Strukturen auf die Druckplatte zu belichten.

Da die Lichtfalle zentrisch unter dem Brenner stehen muß, konnte die Testdruckform natürlich nicht in einem Arbeitsgang belichtet werden. Vorerst mußten schrittweise die drei Testelemente kopiert werden und anschließend in einem letzten Arbeitsgang die Kontrollkeile und Rasterflächen unter Verwendung von Abdeckmasken für die schon belichteten Testelemente.

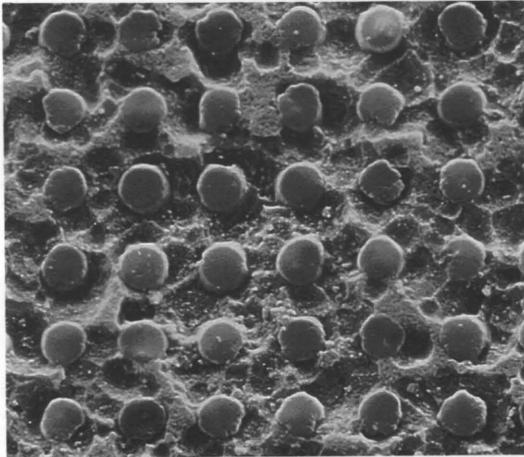
Abb. 6 zeigt rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von verschiedenen Punktgrößen auf der entwickelten Druckplatte. Bei Punktdurchmessern unter  $9 \mu\text{m}$  dominieren die Strukturdimensionen der Plattenoberfläche gegenüber den Punktabmessungen. Dadurch ist die notwendige Verklammerung zwischen den Photopolymerstrukturen und der Platten-



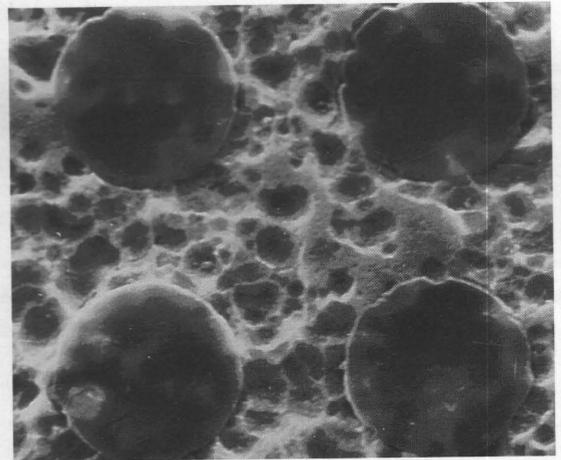
Punktdurchmesser 5  $\mu\text{m}$   
Rasterfrequenz 1360 L/cm



Punktdurchmesser 19  $\mu\text{m}$   
Rasterfrequenz 340 L/cm



Punktdurchmesser 9  $\mu\text{m}$   
Rasterfrequenz 680 L/cm



Punktdurchmesser 40  $\mu\text{m}$   
Rasterfrequenz 167 L/cm

Abb. 6 Aufnahmen entwickelter Druckplatten im Rasterelektronenmikroskop (Betrachtungswinkel  $15^\circ$ , 660-fach vergrößert). Die Originale haben jeweils eine Flächendeckung von 32 %.

oberfläche nicht mehr ausreichend, so daß Punkte, die auf die Plateaus der aufgerauhten Plattenoberfläche zu liegen kommen, Gefahr laufen, schon bei der Entwicklung mechanisch weggerieben zu

werden. Abb. 7 zeigt, daß die Dicke der Photopolymerschicht etwa so groß wie die Durchmesser der kleinsten kopierten Strukturen ist. Damit ist deren Übertragung auf die Druckplatte kaum noch stabil, zudem sind derartige Gebilde gegenüber mechanischer Beanspruchung im anschließenden Druckprozeß vermutlich sehr anfällig.

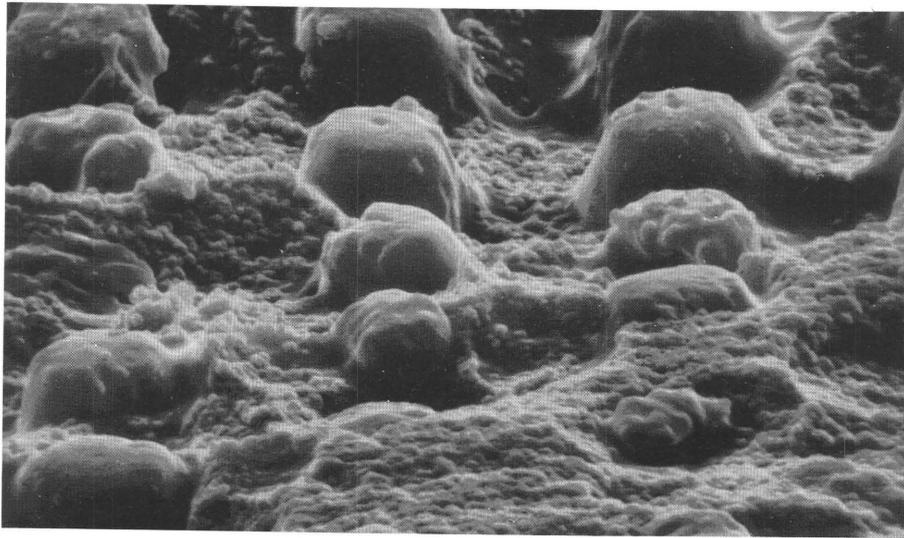


Abb. 7 Aufnahme im Rasterelektronenmikroskop (Betrachtungswinkel  $60^{\circ}$ , Punktdurchmesser  $5 \mu\text{m}$ ,  $1360 \text{ L/cm}$ , 5000-fach vergrößert)

Die Größenabmessungen der durch die Verluste entstehenden Fehlstellen sind im vorliegenden Fall jedoch so gering, daß sie unterhalb des Auflösungsvermögens des Auges liegen. Die Gefahr einer örtlichen Häufung wegbrechender Punkte als Folge der im Vergleich zu den kleinen Druckpunkten sehr rauhen Plattenoberfläche ist jedoch stets gegeben. Bei Punktdurchmessern von  $9 \mu\text{m}$  und mehr sind derartige Verluste nicht mehr feststellbar.

Ganz offensichtlich kommen auch die praxisüblichen Druckplatten der sicheren Übertragung kleinster Strukturen nicht entgegen.

Beim Kopieren zeigt sich die Starrheit der Glasplatten als Nachteil, weil sich Newtonsche Ringe bilden können, die auf einem der Proben-

felder auch visuell erkennbar sind. Zur Auswertung wurden selbstverständlich nur Mikroflächen aus den ungestörten Teilen des Probenfeldes herangezogen.

## 5. Meßmethodik

Die Übertragungssicherheit des Druckvorganges ergibt sich aus der Wahrscheinlichkeit, mit der im wiederholten Versuch, also im Fortdruck, ein diskreter Druckpunkt eine bestimmte Leuchtdichte  $B_{RQ}$  seines Rasterquadrates erzeugt.

Diese Leuchtdichte könnte z.B. unter Verwendung einer quadratischen Blende, deren Kantenlänge gleich der eines Rasterquadrates ist, gemessen werden. Da einzelne Rasterquadrate bzw. einzelne Druckpunkte ohne Vergrößerung nicht erkennbar sind, stellt sich jedoch bei einem derartigen Vorgehen vorerst einmal das Problem, das jeweils interessierende Rasterquadrat aufzufinden. Für unterschiedliche Rasterweiten müssen außerdem unterschiedliche Blenden zur Verfügung stehen, deren exakte Herstellung bei den geforderten Abmessungen von bis hinunter zu  $7,3 \mu\text{m}$  Kantenlänge technisch mit extrem großen Schwierigkeiten verbunden wäre.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, das interessierende Rasterquadrat mit einem Mikroskop ausreichend hoch zu vergrößern und z.B. mit zwei verstellbaren Spalten, die rechtwinkelig zueinanderstehen, das Rasterquadrat im Zwischenbild auszublenden und seine Helligkeit zu messen. Bei den vorliegenden Abmessungen der Rasterquadrate muß jedoch zur exakten Einstellung der Spaltbreiten die Vergrößerung so hoch gewählt werden, daß die Schärfentiefe der Mikroskopobjektive nicht ausreicht, Oberflächenrauigkeiten auszugleichen. Das ebene Zwischenbild der zu beobachtenden Struktur ist nicht mehr identisch mit dieser selbst und kann daher für die Analyse nicht herangezogen werden.

Es wurde daher ein Meßaufbau gewählt, bei dem die mikroskopische Vergrößerung bei voller Apertur lediglich als visuelle Zieleinrichtung dient, zur Messung jedoch ein nahezu achsparalleles, enges Strahlenbündel des Strahlenganges verwendet wird. Die Größe des Meßfleckes ist bei diesem Aufbau konstant und sehr viel kleiner als die Kantenlänge des zu messenden Rasterquadrates, so daß dieses schrittweise abgescannt werden muß. Die mittlere Helligkeit des Rasterquadrates ergibt sich dann durch Integration der gemess-

senen Mikrohelligkeiten. Unterschiedlich große Rasterquadrate werden durch eine unterschiedliche Anzahl von Meßwerten erfaßt.

Als Grundgerät dient dabei ein Mikroskop mit einem durch Schrittmotoren gesteuerten Kreuztisch. Die Schrittweite des Kreuztisches beträgt  $0,25 \mu\text{m}$ . Der Tisch läßt sich sowohl von Hand über einen Joy-Stick als auch durch einen Mikrocomputer gesteuert verfahren. Bei der automatisierten Messung fährt der Tisch, um einen Versatz der Meßpunkte zu vermeiden, nach Aufnahme einer Meßreihe wieder in X-Richtung an den Ausgangspunkt zurück und geht dabei in Y-Richtung einen Schritt weiter. Die winkelgetreue Ausrichtung des zu messenden Objektes erfolgt durch einen feinjustierbaren Drehtisch, der auf dem Kreuztisch befestigt ist. Als Beleuchtung wird eine Xenon-Hochdrucklampe, entsprechend der Normlichtquelle D 65 verwendet, von der das Licht durch Lichtleiter ringförmig unter  $45^\circ$  an das Objekt gebracht wird. Außerdem wird ein Referenzstrahl zum Rechner gegeben, um Helligkeitsschwankungen der Lampe zu kompensieren. Die Intensitätsmessung geschieht mit einem Photomultiplier.

Das verwendete Objektiv vergrößert 7,9-fach und hat eine Apertur von 0,18. In der Zwischenbildebene liegt ein Umlenkprisma, durch das der mittlere Teil des einfallenden Strahlenbüschels zur Intensitätsmessung senkrecht nach oben geht, während der umliegende Bereich des Bildes zur optischen Betrachtung in das Okular geworfen wird. Die Begrenzung und Parallelisierung des Strahlenbüschels erfolgt durch zwei Blenden, die als Lichtfalle in den Strahlengang eingebaut sind. Die erste Blende mit einem Durchmesser von  $d_1 = 5 \mu\text{m}$  liegt etwa in der Zwischenbildebene. Sie schneidet den zentralen Teil des entstehenden Bildes aus und begrenzt damit auf Grund des Vergrößerungsfaktors  $m = 7,9$  den Durchmesser des Meßfleckes im Objekt auf  $d_0 = 0,63 \mu\text{m}$ , denn es gilt

$$d_0 = \frac{1}{m} \cdot d_1 \quad (18)$$

Die Apertur, d.h. der Sinus des halben Öffnungswinkels, mit dem die Strahlen in das Objektiv fallen, beträgt 0,18, woraus sich ein Öffnungswinkel von  $\varphi_0 = 20,7^\circ$  berechnet. Der halbe Winkel  $\varphi_1$ ,

unter dem sich die Strahlen in der Schärfeebene schneiden, berechnet sich aus

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{1}{m} \operatorname{tg} \varphi_0 \quad (19)$$

zu  $\varphi_1 = 1,33^\circ$ . Liegt diese Blende exakt in der Zwischenbildebene, so wird mit diesem Winkel eine weit ausreichende Tiefenschärfe sichergestellt. Der Mikroskopaufbau wurde jedoch vor allem verwendet, um das zu messende Rasterquadrat anvisieren zu können. Dazu muß ein genügend großer Ausschnitt des scharfen Bildes der Zwischenbildebene durch ein Okular betrachtet werden können. Es war daher nicht möglich, die Blende genau in die Zwischenbildebene oder gar darunter zu setzen, da diese mit ihrer Halterung den zu betrachtenden Bildausschnitt zu stark verkleinert hätte. Sie liegt daher über dem Umlenkprisma, wodurch es notwendig wurde, zur Begrenzung des einfallenden Strahlenbüschels eine zweite Blende mit dem Durchmesser  $d_2 = 200 \mu\text{m}$  im Abstand von 11,25 mm in den Strahlengang einzubauen. Dadurch konnte der halbe Öffnungswinkel auf 30 Winkelminuten herabgesetzt werden, was ausreicht, um eine schärfentiefenunabhängige Abbildung sicherzustellen.

Abb. 8 zeigt die Intensitätsverteilung eines Laserstrahles in einer  $10 \mu\text{m}$ -Lochblende. Die geometrische Abmessung der Blende wird sehr gut reproduziert, während der Intensitätsverlauf innerhalb der Blende durch herstellungsbedingt nicht ideale Kantenverläufe verwaschen wird. Somit kann davon ausgegangen werden, daß die örtliche Auflösung den Anforderungen gerecht wird.

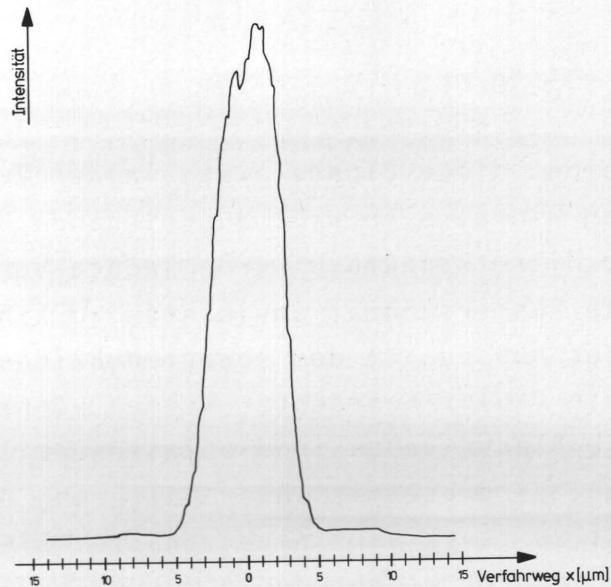


Abb. 8 Wiedergabegenauigkeit der geometrischen Abmessung einer 10  $\mu\text{m}$ -Lochblende, die mit einem Laserstrahl durchleuchtet wurde

Durch Verwendung eines Meßfleckes mit endlichen Abmessungen ergibt sich immer eine Verwaschung bei der Wiedergabe von Kanten, d.h. sprunghaften Helligkeitsänderungen um einen Wert  $\Delta B$ . Geometrische Überlegungen führen zur Gleichung

$$\frac{B_{\text{gem}}}{\Delta B} = (\alpha - \sin\alpha) \frac{1}{2\pi}, \quad (20)$$

wobei  $\alpha$  der Winkel des die Kante überdeckenden Kreisabschnittes ist. Der Verlauf dieser Funktion ist in Abb. 9 dargestellt. Für die Messung eines kreisförmigen Objektes ergibt sich mit dem Radius des Meßfleckes  $r_M$  und dem Radius des Objektes  $r_0$ , sowie dem Öffnungswinkel des überdeckenden Kreisabschnittes der Meßblende  $\alpha_M$  und dem Öffnungswinkel des überdeckten Kreisabschnittes des Objektes  $\alpha_0$

$$\frac{B_{\text{gem}}}{\Delta B} = \frac{1}{\pi r_M^2} \left[ (\alpha_0 - \sin\alpha_0) \frac{r_0^2}{2} + (\alpha_M - \sin\alpha_M) \frac{r_M^2}{2} \right] \quad (21)$$

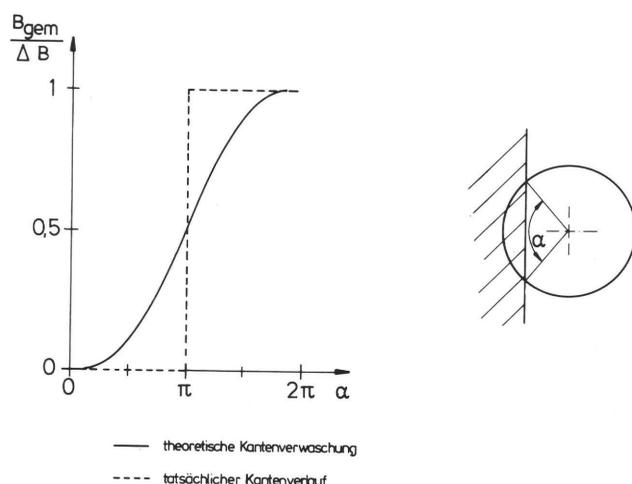


Abb. 9 Kantenverwaschungsfunktion bei Verwendung einer Lochblende

Da die Meßblende nicht exakt in der Zwischenbildebene liegen kann, ergibt sich in Wirklichkeit vermutlich eine etwas breitere Verwaschung. Die eindeutige Vermessung der tatsächlichen Kantenverwaschungsfunktion der Meßapparatur war nicht möglich, da keine Objekte mit einer Kantengenauigkeit besser als  $0,63 \mu\text{m}$  zu finden waren. Daher kann bisher lediglich festgestellt werden, daß die Abbildungsgenauigkeit größer ist als die mit photographischen Materialien erzeugbare Kantenschärfe in Kontrollkeilen (z.B. UGRA). Bei der flächigen Messung, wie sie für die Ermittlung der Dichte eines ganzen Rasterquadrates verwendet wurde, heben sich zudem die Fehler durch die Verwaschung auf Grund der Integration auf.

Eine weitere Verwaschung des Signales könnte jedoch durch die Vorschubgeschwindigkeit des Tisches entstehen. Je schneller der Tisch sich bewegt, desto weniger Photonen können durch die Blenden auf den Photomultiplier fallen. Da die Energiemenge hinter den beiden Blenden schon beim unbewegten Objekt sehr gering ist, war es nicht möglich, die Messungen mit der maximal erreichbaren Frequenz von 10 kHz auszuführen. Die verwendete Frequenz von 200 Hz bildete für

die zur Verfügung stehenden Energien die obere Grenze, bei der eine Verwaschung des Signales nicht feststellbar war. Beim Einsatz höherer Energiemengen, wie sie z.B. bei Transmissionsmessungen erzielbar sind, kann jedoch die maximale Meßfrequenz verwendet werden.

Bei dieser Art des Meßaufbaues ist es nicht sinnvoll, den Tisch nach jedem Schritt des Motors anzuhalten und die Messung durchzuführen. Dabei würden Brems- und Beschleunigungsvorgänge den größten Teil der Zeit in Anspruch nehmen. Daher erfolgt die Bewegung des Tisches in einer Richtung jeweils ununterbrochen und die Helligkeitsmessungen werden mit dem Takt der Schrittmotoren getriggert durchgeführt.

Wegen der Schrittweite bei der Messung von  $0,25 \mu\text{m}$  ergeben sich für das 1360er Raster ( $5 \mu\text{m}$  Druckpunktdurchmesser) 29 Scanlinien zu je 29 Meßpunkten, also 841 Meßwerte. Für eine Rasterfrequenz von  $85 \text{ L/cm}$  ( $40 \mu\text{m}$  Druckpunktdurchmesser) ergeben sich jedoch schon 471 Scanlinien zu je 471 Meßpunkten, also 221841 Meßwerte. Da vor allem Input/Output-Vorgänge beim Rechner sehr zeitintensiv sind, und zudem die Energiemenge, die hinter den Blenden gemessen wird, sehr gering ist, so daß die Messungen nicht mit der maximal möglichen Geschwindigkeit des Tisches erfolgen können, dauern die Messungen recht lange. Es ergeben sich Meßzeiten für je ein Rasterquadrat zwischen 24 Sekunden beim 1360er Raster mit einer Kantenlänge von  $7,3 \mu\text{m}$  und 36,4 Minuten beim 85er Raster mit einer Kantenlänge von  $117,6 \mu\text{m}$ .

Die Schrittweite des Kreuztisches ist mit  $0,25 \mu\text{m}$  geringer als der Meßfleckdurchmesser. Trotzdem wurde diese Schrittweite für die Messung verwendet, um für die Integration möglichst viele Einzelmeßwerte zur Kompensation des Rauschens zu erhalten. Eine Verfälschung des Ergebnisses findet dadurch nicht statt, da bei einer Schrittweite, die kleiner ist als der Meßfleckdurchmesser die Verwaschung allein durch die Meßfleckgeometrie bewirkt wird.

Die Meßsignale des Photomultipliers werden an den Arbeitsbereich des A/D-Wandlers angepaßt. Es entsteht eine digitalisierte Hellig-

keit  $B_{Di}$ , die proportional zur örtlichen Objekthelligkeit  $B_i$ , entsprechend

$$B_{Di} = k_1 \cdot B_i + k_2,$$

ist. Der Mittelwert  $\bar{B}_D$  der Einzelmeßwerte  $B_{Di}$ , der proportional zur Helligkeit des gemessenen Rasterquadrates  $B_{RQ}$  ist, berechnet sich unabhängig vom Meßfleckdurchmesser aus der Anzahl der Messungen  $n$ , die durch die Schrittweite bestimmt wird, zu

$$\bar{B}_D = \frac{\sum B_{Di}}{n} = k_1 \cdot B_{RQ} + k_2 \quad (22)$$

Da das Meßgerät keine Absolutwerte mißt, wurde die Umrechnung der Helligkeit  $\bar{B}_D$  in die optische Dichte  $D_{RQ}$  über eine Eichung vorgenommen. Die Eichkurve (Abb. 10), die mit einem photographischen Kontrollkeil erstellt wurde, zeigt den Zusammenhang zwischen der optischen Dichte und dem Meßwert.

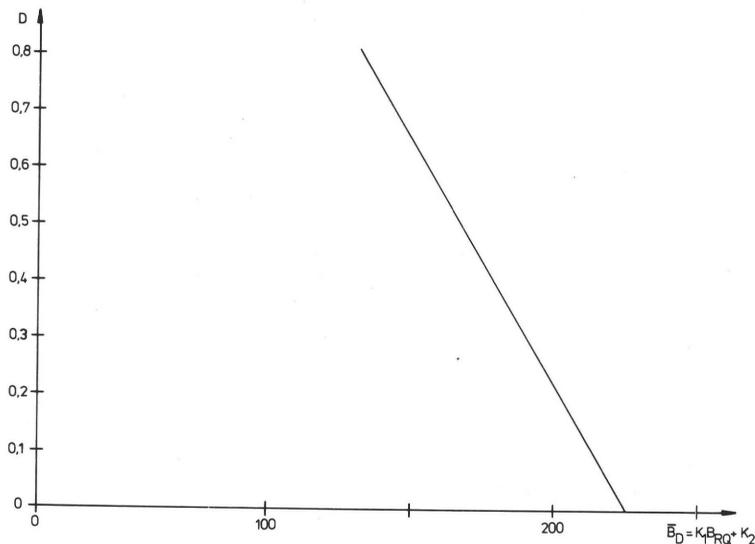


Abb. 10 Zusammenhang zwischen optischer Dichte und Meßwert

Die Messung wurde soweit automatisiert, daß nach dem Einlegen und der winkelgenauen Ausrichtung der Probe jeweils fünf Rasterpunkte in einem Probenfeld gemessen wurden. Die Koordinaten dieser zu untersuchenden Rasterquadrate blieben über der Auflage konstant. So war es in der folgenden Auswertung möglich, den Mikrodichteverlauf von einzelnen Druckpunkten über der Auflage zu verfolgen.

## 6. Druckversuche und Auswertung

Die Druckversuche wurden mittels einer modernen marktgängigen Bogen-Offset-Druckmaschine mit Alkohol-Feuchtwerk durchgeführt. Als Druckform wurde eine handelsübliche Positiv-Druckplatte eingesetzt. Auch die Druckfarbe, das Gummituch und das Feuchtmittel waren handelsüblich und praxisgerecht. Als Bedruckstoff wurde ein glänzend gestrichenes Papier eingesetzt.

Die gedruckte Auflage betrug 20000 Bogen, wobei fünf verschiedene Fortdruckbedingungen eingestellt wurden:

1. Bogen 1 bis 5000  
Volltondichte 1,78, Geschwindigkeit 6000 Bogen/Stunde
2. Bogen 5001 bis 10000  
Volltondichte 1,78, Geschwindigkeit 7000 Bogen/Stunde  
Halt nach dem 7500. Bogen wegen Stapelwechsel,  
Halt nach dem 7800. Bogen wegen gerissenem Papier
3. Bogen 10001 bis 15000  
Volltondichte 1,95, Geschwindigkeit 8000 Bogen/Stunde  
Halt nach dem 15000. Bogen wegen Stapelwechsel
4. Bogen 15001 bis 18400  
Volltondichte 1,95, Geschwindigkeit 9000 Bogen/Stunde  
Halt nach dem 18400. Bogen, um das Gummituch zu waschen
5. Bogen 18401 bis 20000  
Volltondichte 1,95, Geschwindigkeit 9000 Bogen/Stunde

Nach jeweils 100 Drucken wurden 3 Testbogen gezogen.

Abb. 11 zeigt das Testelement, in dem die Probenfelder derart angeordnet sind, daß in einer waagrechten Reihe nebeneinander die gleiche geometrische Flächendeckung mit jeweils unterschiedlichen Punktgrößen realisiert ist.

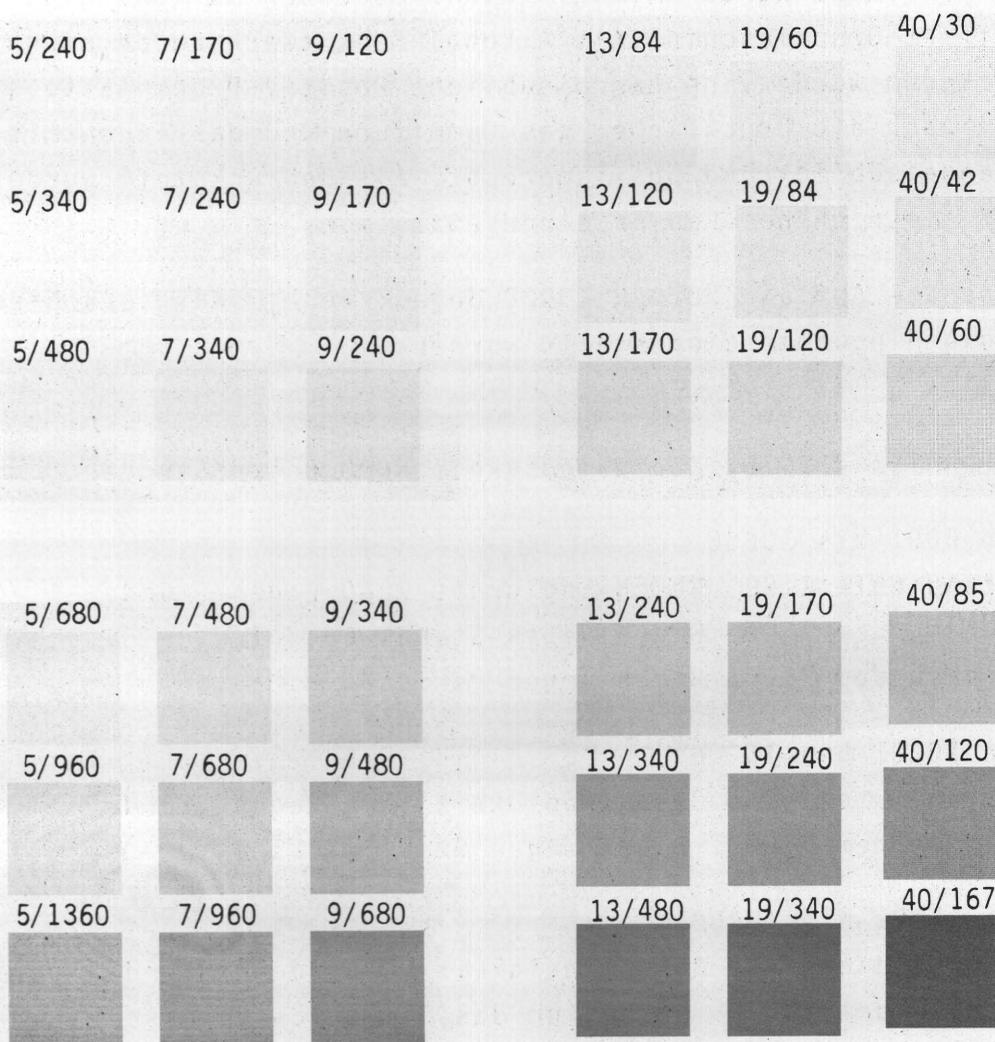


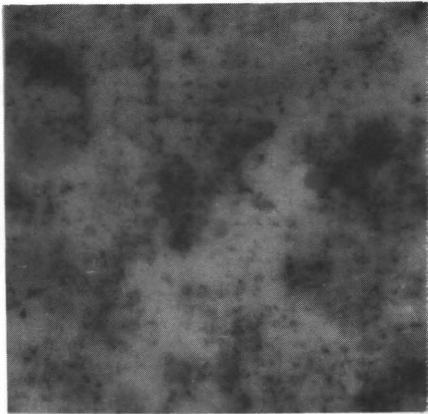
Abb. 11 Testelement (Die Zahlen vor dem Schrägstrich geben die gerundete Punktgröße in  $\mu\text{m}$  und jene dahinter die Rasterfrequenz in  $\text{L/cm an}$ )

In den senkrechten Reihen wird dabei mit konstanter Punktgröße die Flächendeckung von 1 %, 2 %, 4 %, 8 %, 16 % und 32 % erzeugt. Die Rasterfrequenz steigt mit zunehmender Flächendeckung. Mit diesen senkrecht angeordneten Graukeilen ist jeweils ein frequenzmodulierter Bildaufbau mit unterschiedlichen Druckpunktgrößen simuliert. Graukeile unterschiedlicher Rasterfrequenz mit amplitudenmoduliertem Bildaufbau werden in den Diagonalen simuliert. Auf Grund

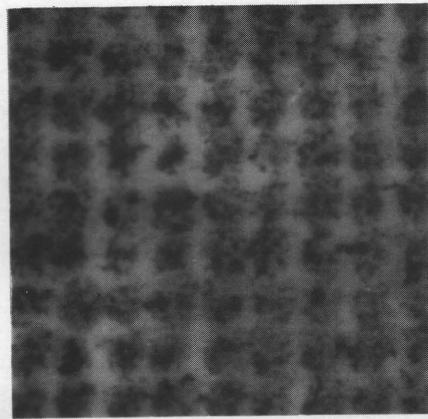
des beschränkten Probenumfangs konnten jedoch nur wenige Grautöne reproduziert werden. Man sieht jedoch, daß bei angepasster Technik und bei genügender Sorgfalt bei der Herstellung der Vorlagen und der Druckplatte ein amplitudenmodulierter Bildaufbau mit Rasterfrequenzen von 170 oder 240 L/cm mit stehenden 1 %-Punkten drucktechnisch durchaus noch realisierbar sein müßte.

Die 1 %- und 2 %-Felder mit 5  $\mu\text{m}$  Punktdurchmesser und das 1 %-Feld mit 7  $\mu\text{m}$  Punktdurchmesser sind visuell und meßtechnisch kaum mehr vom Papierweiß unterscheidbar.

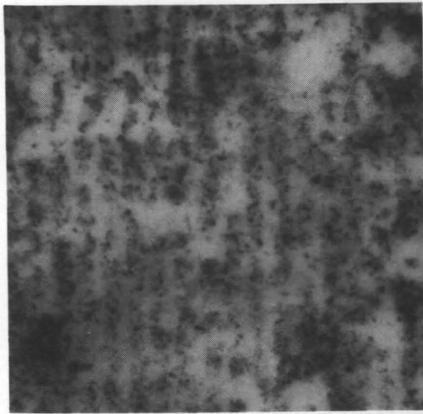
Von links nach rechts; also mit steigender Punktgröße bei konstanter geometrischer Flächendeckung in der Vorlage, ist in jeder Zeile ein Dunklerwerden der Probenfelder zu beobachten. Dafür sind nicht die Verluste kleinster Rasterpunkte bei der Plattenkopie maßgeblich, obwohl sie natürlich mitwirken. Die mikrophotographischen Aufnahmen der Probenfelder z.B. mit 32 % Flächendeckung in Abb. 12 und der Mikroschnitte in Abb. 13 zeigen nämlich, daß dies auf eine steigende flächenbezogene Farbmenge innerhalb der größer werdenden Rasterpunkte zurückzuführen ist. In der Tat entstehen erst bei Punktdurchmessern von 40  $\mu\text{m}$  in allen Rasterpunkten Teilflächen, welche die Volltondichte aufweisen. Diese Verhaltensweise, welche die Druckkennlinie mitbestimmt und in der Vorstufe mitberücksichtigt werden muß, war auf Grund früherer Untersuchungen zur Farbübertragung und Farbspaltung zu erwarten /11, 12, 13/. Bei größeren Punktabständen lassen sich entsprechend der Physiologie des Auges durch den höheren Kontrast zwischen dem unbedruckten Papier und diesen vollgedeckten Flächen schließlich die Einzelpunkte erkennen /3, 14/.



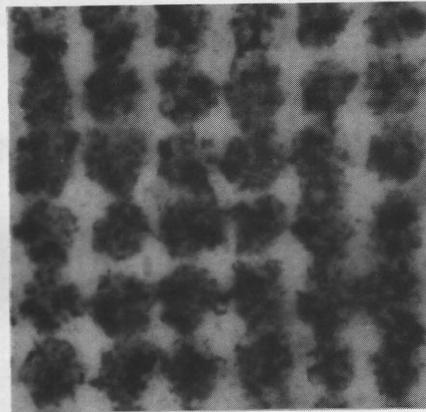
Punktdurchmesser 5 µm  
Rasterfrequenz 1360 L/cm



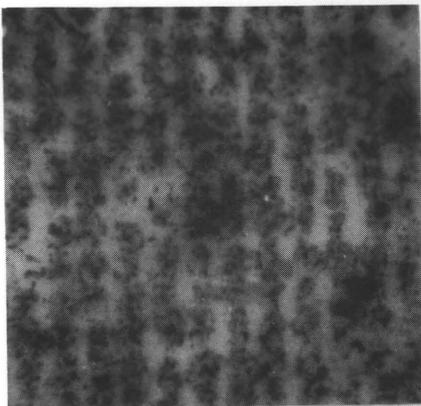
Punktdurchmesser 13 µm  
Rasterfrequenz 480 L/cm



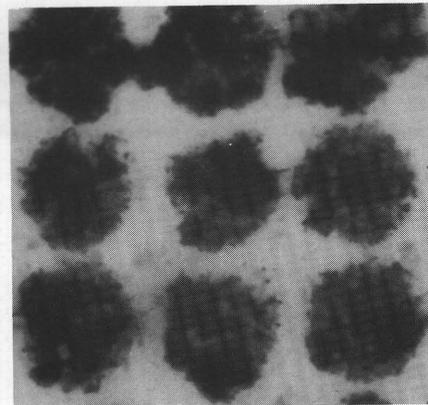
Punktdurchmesser 7 µm  
Rasterfrequenz 960 L/cm



Punktdurchmesser 19 µm  
Rasterfrequenz 340 L/cm

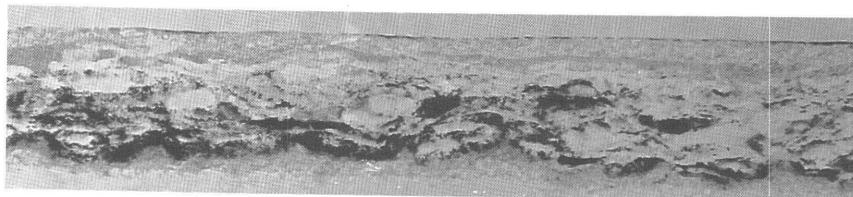


Punktdurchmesser 9 µm  
Rasterfrequenz 680 L/cm

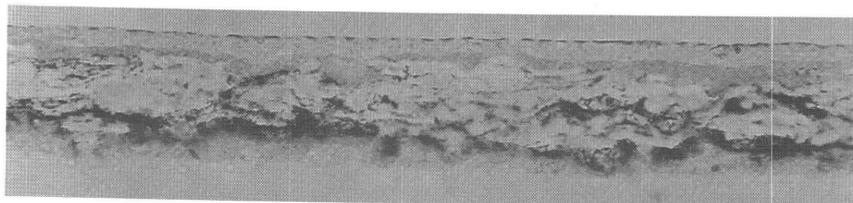


Punktdurchmesser 40 µm  
Rasterfrequenz 167 L/cm

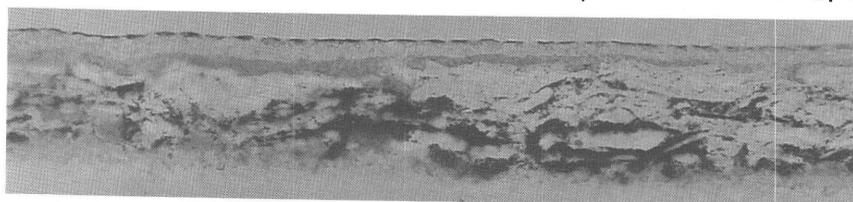
Abb. 12 Rasterpunkte auf dem Papier (Vergrößerung 350-fach, Flächendeckung in der Vorlage 32 %)



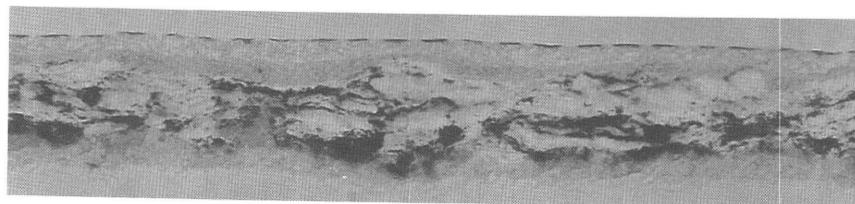
Punktdurchmesser 5  $\mu\text{m}$  Rasterfrequenz 1360 L/cm



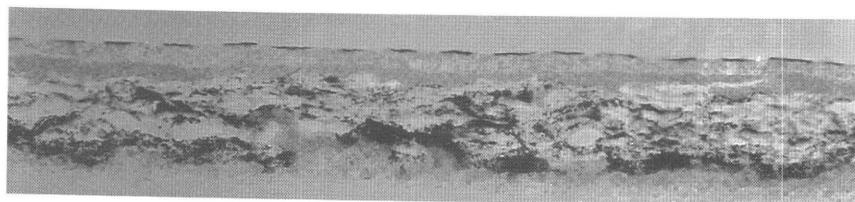
Punktdurchmesser 7  $\mu\text{m}$  Rasterfrequenz 960 L/cm



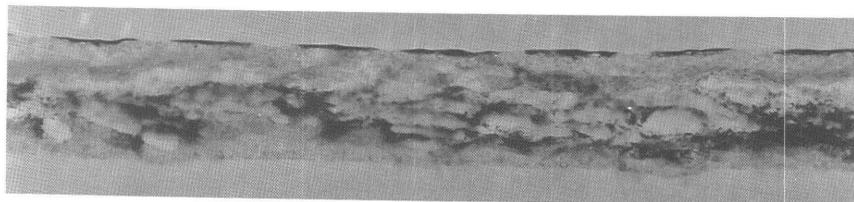
Punktdurchmesser 9  $\mu\text{m}$  Rasterfrequenz 680 L/cm



Punktdurchmesser 13  $\mu\text{m}$  Rasterfrequenz 480 L/cm



Punktdurchmesser 19  $\mu\text{m}$  Rasterfrequenz 340 L/cm



Punktdurchmesser 40  $\mu\text{m}$  Rasterfrequenz 167 L/cm

Abb. 13 Rasterpunkte auf dem Papier (Mikroschnitte, Vergrößerung 250-fach, Flächendeckung in der Vorlage 32 %)

Der Mikrobildanalysator liefert die mittlere Dichte eines einzelnen, einen Rasterpunkt enthaltenden Rasterquadrates. Verfolgt man diese über die Auflage, so erhält man eine Aussage über die Farbübertragungssicherheit eines einzelnen Druckpunktes.

Dazu muß auf jedem Bogen der Auflage jeweils das Rasterquadrat mit den gleichen Koordinaten aufgesucht und dessen Mikrodichte ermittelt werden. Der Verlauf der bei einer Flächendeckung in der Vorlage von 32 % gemessenen Mikrodichtewerte über der Auflage ist in den Diagrammen von Abb. 14 dargestellt. Dabei ist die Gesamtauflage ent-

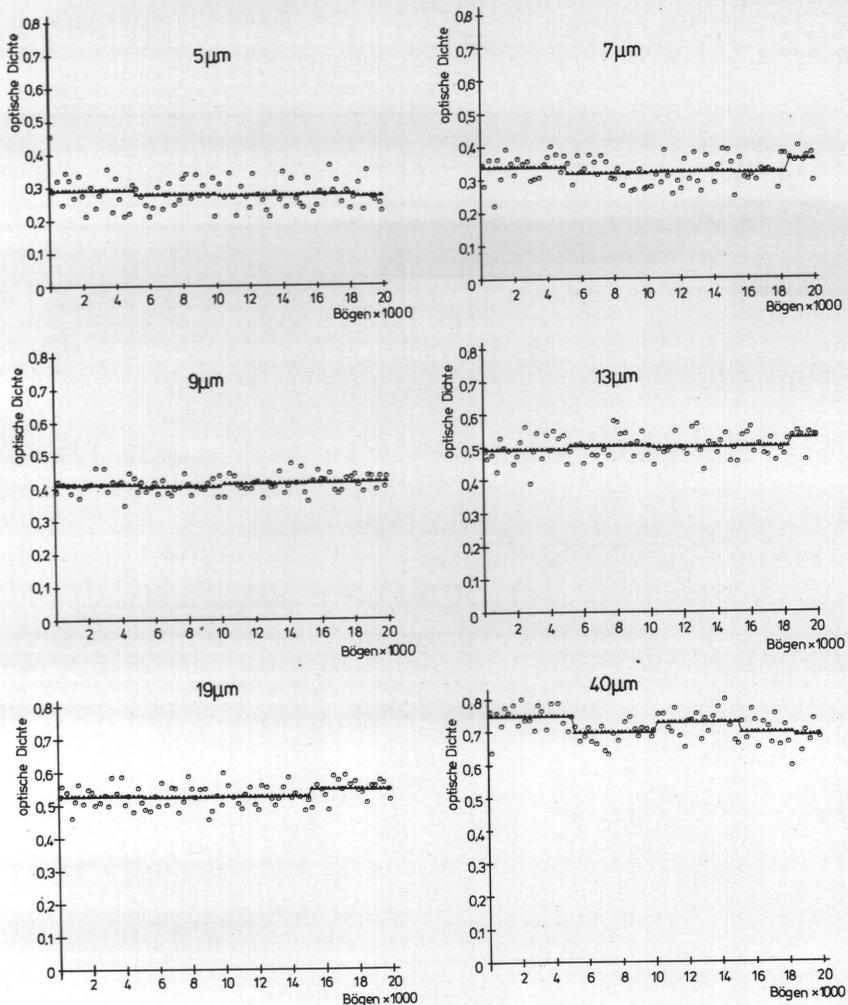


Abb. 14 Verlauf der Mikrodichten  $D_{RQ}$  über der Auflage (Flächendeckung in der Vorlage jeweils 32 %, je 81 Stichproben)

Der vorliegende Bericht umfaßt die Ergebnisse des 1984 unter der Leitung von Prof. Dipl.-Ing. Karl R. Scheuter begonnenen Forschungsvorhabens "Die Sicherheit der Farbübertragung bei kleinsten Bildpunkten im Offsetdruck". Sachbearbeiterin war

Dipl.-Ing. Sibylle Gölling

Finanzieller Träger des Forschungsvorhabens war die Forschungsgesellschaft Druckmaschinen e.V. mit Zuwendungen des Bundeswirtschaftsministeriums über die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen A.I.F.

Dank gebührt den Mitgliedsfirmen der Forschungsgesellschaft Druckmaschinen e.V. für ihre Unterstützung durch Sachspenden.



sprechend der Versuchsdurchführung in fünf Bereiche mit jeweils konstanten Fortdruckbedingungen unterteilt. Die über jeweils einen Bereich gemittelte Mikrodichte ist als zu erwartender Durchschnittswert ebenfalls in die Diagramme eingetragen. Eine eindeutige Abhängigkeit der durchschnittlichen Mikrodichtewerte von den Änderungen der Versuchsparameter ist nur bei dem 40  $\mu\text{m}$ -Punkt feststellbar. Der mittlere Mikrodichtewert fällt mit steigender Geschwindigkeit, steigt mit erhöhter Volltondichte und fällt wiederum mit weiter ansteigender Geschwindigkeit. Dieser charakteristische Verlauf ist bei den kleineren Punktgrößen nicht mehr eindeutig feststellbar. Das heißt vorläufig, daß die Mikrodichte der kleineren Punktgrößen praktisch immun gegen Stelleingriffe ist.

Die Stabilität, mit welcher der jeweils gewählte Punkt die durchschnittliche Mikrodichte erreicht, läßt sich anhand der Standardabweichung beurteilen (Abb. 15). Diese liegt, absolut gesehen, für

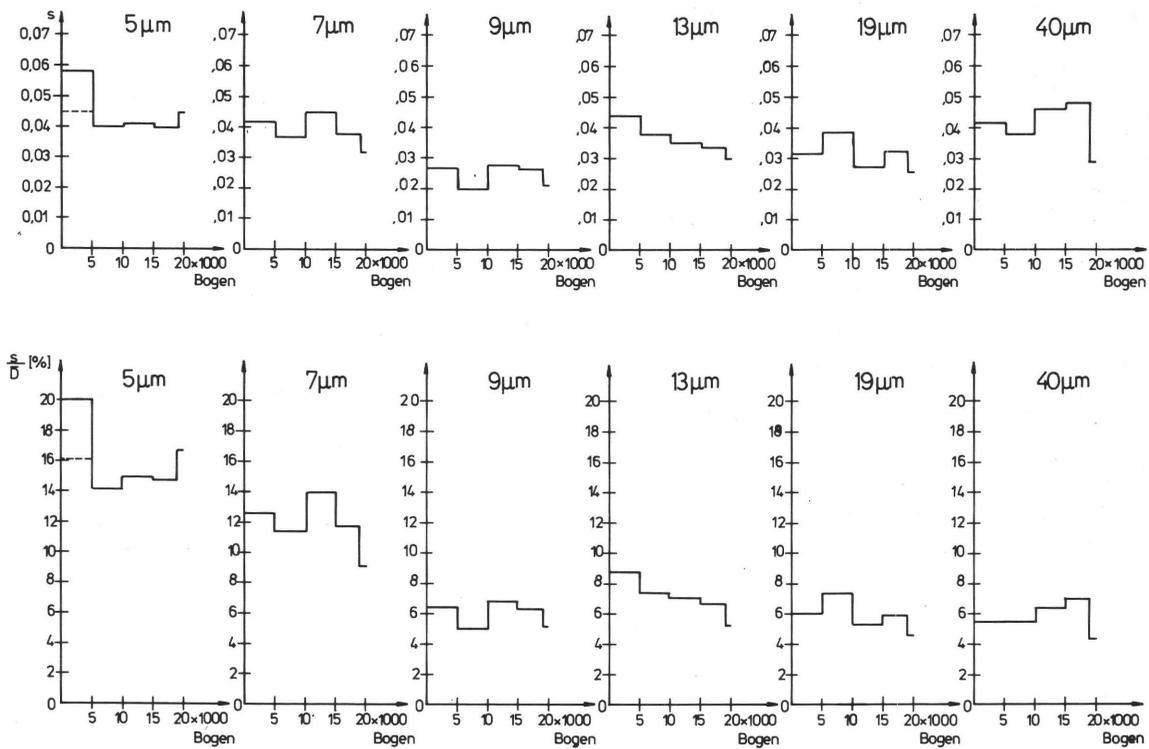


Abb. 15 Verlauf der absoluten (oben) und der relativen (unten) Standardabweichungen der Mikrodichten  $D_{RQ}$  über der Auflage, ermittelt über die fünf Bereiche mit jeweils konstanten Fortdruckbedingungen

den 9  $\mu\text{m}$ -Punkt mit 0.02 bis 0.03 Dichteeinheiten am günstigsten, während der 5  $\mu\text{m}$ - und der 40  $\mu\text{m}$ -Punkt mit 0.04 bis 0.05 Dichteeinheiten die größten Schwankungsbreiten aufweisen. Die drei übrigen Punktgrößen zeigen Übertragungsunsicherheiten, die zwischen diesen Extrema liegen. Da die mittlere Mikrodichte jedoch mit steigenden Punktdurchmessern zunimmt, ist die relative Standardabweichung für die kleinsten Punktdurchmesser am größten. Die besonders hohe Standardabweichung der mittleren Dichte des 5  $\mu\text{m}$ -Punktes im ersten Bereich ist jedoch auf den ersten Meßwert zurückzuführen, der als Ausreißer betrachtet werden muß. Ohne Berücksichtigung dieses Ausreißers ergeben sich die gestrichelten korrigierten Kurven. Eine Abhängigkeit der Streubreite der erreichten Mikrodichtewerte dieser gewählten Druckpunkte von den Änderungen der Stellparameter ist nicht eindeutig feststellbar. Für diese Verhaltensweise konnte mit dem heutigen Wissensstand bisher keine stichhaltige Erklärung gefunden werden. Tabelle 2 gibt die Zahlenwerte der mittleren Mikrodichten mit den zugehörigen Standardabweichungen an.

Punkt- durch- messer	1. Bereich		2. Bereich		3. Bereich		4. Bereich		5. Bereich	
	$\bar{D}_{RQ}$	s								
5 $\mu\text{m}$	0.290	0.058	0.277	0.039	0.273	0.041	0.275	0.041	0.268	0.045
7 $\mu\text{m}$	0.338	0.042	0.318	0.037	0.322	0.045	0.320	0.038	0.359	0.033
9 $\mu\text{m}$	0.410	0.027	0.403	0.020	0.412	0.028	0.414	0.027	0.416	0.022
13 $\mu\text{m}$	0.493	0.044	0.505	0.038	0.500	0.036	0.502	0.034	0.528	0.030
19 $\mu\text{m}$	0.527	0.032	0.524	0.039	0.526	0.028	0.548	0.032	0.546	0.026
40 $\mu\text{m}$	0.747	0.042	0.698	0.038	0.727	0.046	0.697	0.049	0.687	0.029

Tabelle 2 Mittlere Mikrodichten  $\bar{D}_{RQ}$  und Standardabweichungen für die fünf Bereiche mit jeweils konstanten Fortdruckbedingungen

Für den optisch relevanten Eindruck ist jedoch nicht die Dichte eines einzelnen Rasterquadrates ausschlaggebend, sondern die integrale Dichte über einen visuell erkennbaren Bereich, die durch das

Zusammenwirken vieler Druckpunkte und des umgebenden unbedruckten Papiers entsteht. Dabei werden sich zufallsbedingte Einflüsse bei der Farbspaltung und bei der Verteilung der Farbe auf dem Papier zum Teil kompensieren, so daß mit einer Verringerung der Streubreite zu rechnen ist.

Diese Vermutung bestätigt sich, wenn der Verlauf der Dichte, die jeweils über eine Fläche von 3 mm Durchmesser integral gemessen wurde, über der Auflage dargestellt wird (Abb. 16). Die über die

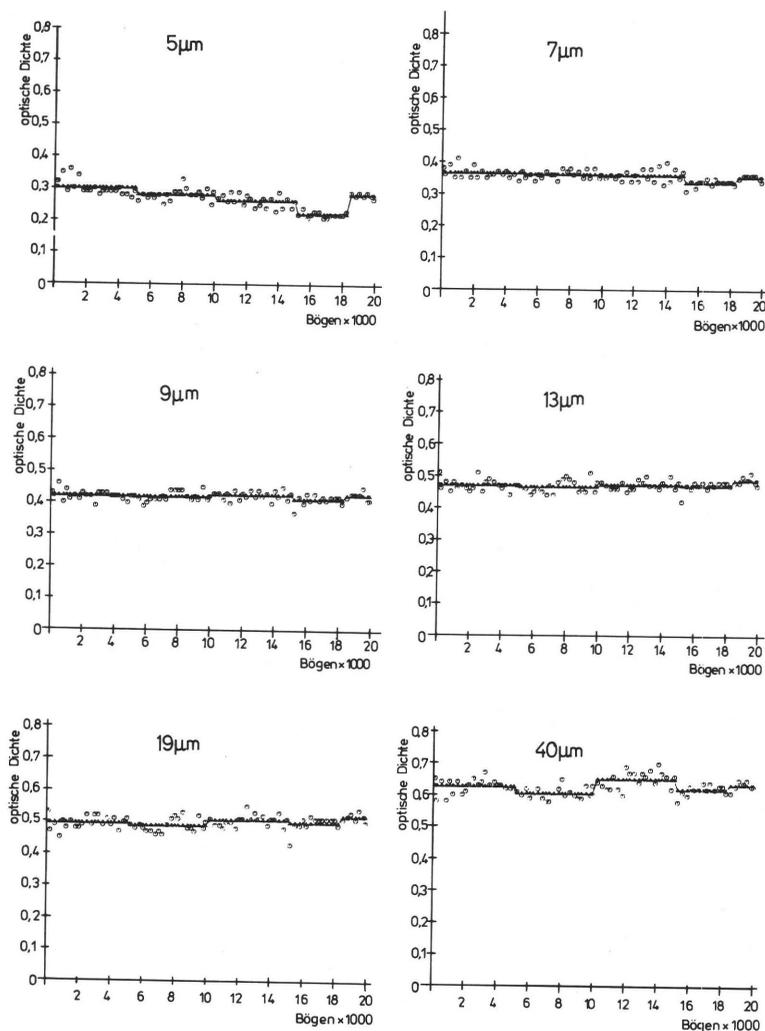


Abb. 16 Verlauf der integralen Dichten  $D_I$  über der Auflage (Flächendeckung in der Vorlage jeweils 32 %, je 81 Stichproben)

fünf Bereiche mit jeweils konstanten Druckbedingungen gemittelten Dichtewerte und die zugehörigen absoluten und relativen Standardabweichungen sind in Tabelle 3 angegeben.

Punkt- durch- messer	1. Bereich		2. Bereich		3. Bereich		4. Bereich		5. Bereich	
	$\bar{D}_I$	s								
5 $\mu\text{m}$	0.300	0.024	0.280	0.019	0.263	0.019	0.222	0.009	0.283	0.008
7 $\mu\text{m}$	0.365	0.017	0.361	0.013	0.359	0.019	0.336	0.011	0.354	0.008
9 $\mu\text{m}$	0.421	0.015	0.419	0.016	0.425	0.014	0.412	0.016	0.426	0.014
13 $\mu\text{m}$	0.470	0.018	0.466	0.021	0.472	0.014	0.469	0.017	0.487	0.014
19 $\mu\text{m}$	0.495	0.020	0.488	0.021	0.506	0.018	0.498	0.023	0.519	0.013
40 $\mu\text{m}$	0.626	0.022	0.606	0.018	0.651	0.027	0.619	0.017	0.634	0.014

Tabelle 3 Mittlere integrale Dichten  $\bar{D}_I$  und Standardabweichungen für die fünf Bereiche mit jeweils konstanten Fortdruckbedingungen

Wie auch bei den Einzelpunkten ist eine Abhängigkeit des Verlaufs der mittleren Dichte von den während der Auflage veränderten Parametern Volltondichte und Geschwindigkeit nur bei den Druckpunkten von 40  $\mu\text{m}$  Durchmesser zu beobachten. Bei Punktdurchmessern von 19  $\mu\text{m}$  ist dieser Einfluß nur noch schwach ausgeprägt und bei kleineren Druckpunkten gar nicht mehr erkennbar. Somit scheint die Aussage gerechtfertigt, daß Druckpunkte mit Durchmessern zwischen 10  $\mu\text{m}$  und 20  $\mu\text{m}$  bei den heute praxisüblichen Materialien die größte Stabilität gegenüber Stelleingriffen aufweisen und damit geringere Anforderungen an die Stellgenauigkeit stellen. Dies bedeutet natürlich auch, daß die Stellmöglichkeiten entsprechend geringer sind und daß deshalb in den Vorstufen genauer gearbeitet werden muß. Wer die Qualitätssteigerung, welche durch Nutzung kleiner Raster- bzw. Druckpunkte möglich ist, nutzen will, muß diese Forderung akzeptieren.

Ferner zeigen die 5  $\mu\text{m}$ -Punkte über die ganze Auflage und die 7  $\mu\text{m}$ -Punkte im letzten Viertel der Auflage den Trend zu geringen Dichtewerten. Dies ist nicht etwa auf einen mechanischen Abrieb der Druckpunkte auf der Druckplatte zurückzuführen, sondern hat seine Ursache in einer Verschmutzung des Gummituches, wie durch den erneuten Dichteanstieg nach dem Waschen des Gummituches gegen Ende der Auflage gezeigt werden konnte. Offensichtlich ist auch das Material der praxisüblichen Gummitücher nicht auf die Anforderungen der Farbübertragung bei Mikrostrukturen optimiert.

Abb. 17 zeigt die zugehörigen relativen Standardabweichungen über der Auflage. Im allgemeinen ist die Standardabweichung auf etwa die Hälfte derjenigen der Einzelpunkte gesunken.

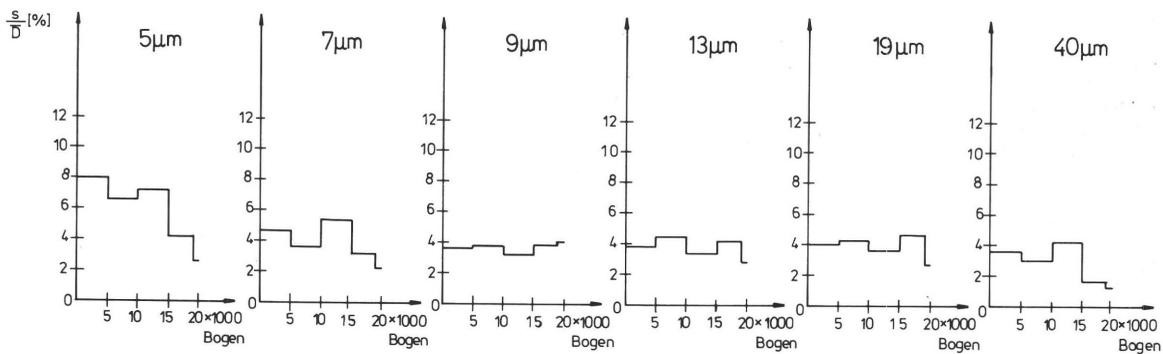


Abb. 17 Verlauf der relativen Standardabweichungen der integralen Dichten  $D_I$  über der Auflage, ermittelt über die fünf Bereiche mit jeweils konstanten Fortdruckbedingungen

Für Punktgrößen von 9  $\mu\text{m}$  bis 19  $\mu\text{m}$  scheint sich die Erhöhung der Geschwindigkeit negativ, die Erhöhung der Volltondichte positiv auf die Stabilität der Dichtewerte auszuwirken.

Die Punktgrößen von 5  $\mu\text{m}$ , 7  $\mu\text{m}$  und 40  $\mu\text{m}$  zeigen das entgegengesetzte Verhalten. Da sich die Druckpunkte bei anderen Flächendeckungen jedoch zum Teil wieder abweichend verhalten, können eindeutige Aussagen über den Einfluß der Stelleingriffe auf die Stabilität,

mit der ein mittlerer Dichtewert bei konstanten Fortdruckbedingungen erreicht wird, noch nicht gemacht werden. Der Verlauf der relativen Standardabweichung über den Punktgrößen in Abb. 18 zeigt

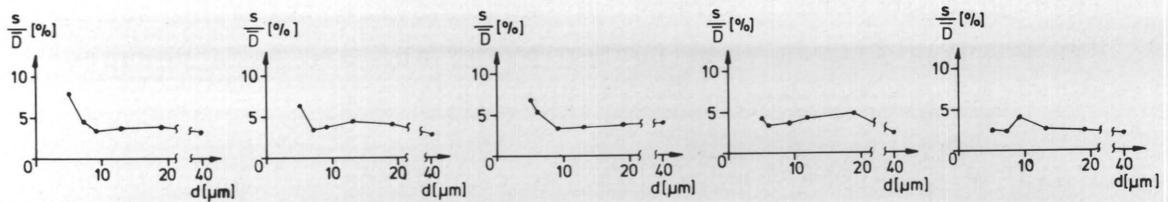


Abb. 18 Verlauf der relativen Standardabweichungen der integralen Dichten  $D_I$  über der Punktgröße für jeweils einen Bereich konstanter Fortdruckbedingungen

in allen Bereichen ein charakteristisches Verhalten, wobei ein Minimum zwischen etwa 7  $\mu\text{m}$  und 13  $\mu\text{m}$  festgestellt werden kann. Dies ist besonders bemerkenswert, da der absolute Meßfehler, der unabhängig vom gemessenen Dichtewert  $\pm 0.01$  Dichteeinheiten beträgt, bei geringeren Dichtewerten zu großen relativen Meßungenauigkeiten führt. Die hohen relativen Standardabweichungen bei 5  $\mu\text{m}$ -Punkten sind daher in erster Linie auf diese Meßungenauigkeiten zurückzuführen.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte nachgewiesen werden, daß moderne Druckmaschinen durchaus in der Lage sind, Mikrostrukturen als Bildelemente bis hinab zu Abmessungen von 5  $\mu\text{m}$  sicher zu übertragen, wobei zur endgültigen Beurteilung der Übertragungssicherheit die in einem visuell relevanten Flächenbereich entstehende optische Dichte maßgebend war. Zieht man den Vergleich mit den allgemein als problemlos anerkannten Punktgrößen von über 20  $\mu\text{m}$  Durchmesser, dann stellt man fest, daß selbst mit den heute praxisüblichen Druckplatten Punkte von 10  $\mu\text{m}$  Durchmesser mit höherer Übertragungssicherheit drucken. Die Schwierigkeiten bei der Herstellung photoähnlicher Drucke hoher Auflösung besteht demnach nicht in den drucktechnischen Grenzen der Farbübertragungssicherheit, sondern in der Vorstufe, in welcher derzeit weder alle Geräte noch alle Materialien zur Übertragung kleinster Strukturen ausgelegt sind. Mit verbesserter Technologie ist es unzweifelhaft möglich, die Punktabmessungen und die daraus resultierenden Farbwolken im Druck in die Größenordnung der photographischen Kornstrukturen hochauflösender Materialien zu bringen.

Wegen der in den Druckversuchen festgestellten Unempfindlichkeit kleinster Druckpunkte gegen Stelleingriffe sind Korrekturen im Druck nur noch bedingt möglich. Es reicht deshalb die Verbesserung von Geräten und Materialien alleine nicht aus. Zusätzlich muß im ganzen Reprobereich und in der Plattenkopie präziser gearbeitet werden. Die Druckmaschinenindustrie, die das vorliegende Forschungsvorhaben förderte, hat sich seit langem die Erfüllung höchster Präzisionsforderungen zu eigen gemacht und damit die Grundlage zu höchster Druckqualität geschaffen. Sie hat dieses Ziel nicht nur durch verbesserte Technologie erreicht, sondern nicht zuletzt durch gezielte Förderung des Qualitätsbewußtseins jedes ihrer Mitarbeiter.

Aus den durch frühere praktische Versuche gestützten theoretischen Überlegungen geht jedoch auch hervor, daß die Verbesserung von Geräten und Materialien der Reprotechnik nur dann einen wirklich grundlegenden Beitrag zur Erhöhung der Druckqualität bringt, wenn der frequenzmodulierte Bildaufbau an Stelle des heutigen autotypischen Bildaufbaues eingeführt wird.

Literaturverzeichnis

- /1/ WOLF, K.: Beitrag zur Systemtheorie der Druckverfahren, Diss. Darmstadt 1970
- /2/ HRADEZKY, R.: Objektive Qualitätsbeurteilung von Druckprodukten und Möglichkeiten zur analytischen Behandlung von Reproduktions- und Druckprozessen mit Hilfe der Informationstheorie, Diss. Darmstadt 1977
- /3/ GERDES, H.-R.: Das Wahrnehmen von Lichtzeichen an der achromatischen und chromatischen Schwelle, Diss. Darmstadt 1979
- /4/ EP 0 132 453: Verfahren und Einrichtung zum Minimieren von Fehlern bei der digitalen Verarbeitung von elektrischen Signalen
- /5/ FISCHER, G.: Der frequenzmodulierte Bildaufbau - ein Beitrag zum Optimieren der Druckqualität, Diss. Darmstadt 1986 (in Erscheinung)
- /6/ RÖHLE, S.: Der derzeitige Erkenntnisstand auf dem Gebiet der Farbübertragung, Papier und Druck 28 (1979) 1 und folgende
- /7/ OTSCHIK, G., SCHULZ, W.: Offset-Reproduktion - Bundesverband Druck e.V. 1976
- /8/ REBNER, W., BRUNE, M.: Quantitative und systematische Untersuchung als Grundlage zur Theorie von autotypischen Prozessen, FOGRA-Forschungsbericht 6.010, 1975
- /9/ SCHULZ, W.: Mikroskopische Beurteilung von elektronisch erzeugten Rasterpunkten, FOGRA-Forschungsbericht
- /10/ NEUMANN, D.: Zu Problemen der Ausleuchtung bei Offsetkopiergeräten, Papier und Druck 34 (1985) 6, S. 279-281
- /11/ WAGENBAUER, K.: Beiträge zum Druckprozeß bei Offset-Bogenrotationsmaschinen, Diss. Darmstadt 1959
- /12/ RUPP, E., RIECHE, K.: Beiträge zur Bedruckbarkeit von Papier und Folien, Inst. für Grafische Technik, Leipzig 1959
- /13/ - Unveröffentlichte persönliche Mitteilung von Dipl.-Phys. R. Wiesner
- /14/ SCHÖBER, H.: Das Sehen - Band 2, 3. Auflage, VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1964