

ist die Steg-Zähl-Methode bei diesen Markierungen nicht zu Datierungen oder Echtheitsfragestellungen geeignet.

Bei maschinell erzeugtem Papier gibt es allerdings eine Reihe regelmäßiger Strukturen, die mit bloßem Auge nicht erkannt werden können. Um diese zu erschließen, bedarf es technischer Verfahren, wie beispielsweise der Fast Fourier Transformation.

### Fast Fourier Transformation - eine neue Untersuchungsmethode

Um zum einen die Chancen, die sich mit der Fast Fourier Transformation (FFT) bieten können, aber andererseits auch ihre Grenzen deutlich zu machen, soll deren Grundlage und Arbeitsweise erläutert werden. Dazu dienen Abbildungen, die einige Strukturen erkennen lassen. Zunächst möchte ich aber ein konkretes Beispiel der Echtheitsfragestellung in der Kunstgeschichte aufgreifen.

Im Zusammenhang mit dem schon erwähnten Theo van Doesburg zugeschriebenen Objekt T 23, wurden H. Porck (Restaurator und Papierhistoriker an der Koninklijke Bibliotheek Den Haag) und A.Kardinaal mit den Papieruntersuchungen beauftragt. Sie beschränkten sich dabei auf die optische Begutachtung, da daraus schon maßgebliche Schlussfolgerungen zu ziehen waren. Es zeigte sich, dass T 23 auf einem Papier gemalt ist, welches eine für diese Zeit ungewöhnliche und von der Leinwandbindung verschiedene Papiermaschinen-siebstruktur aufwies<sup>173</sup> (Abbildung 56). Bis zum Ende der 20er Jahre des vergangenen Jahrhunderts kamen praktisch aber nur leinwandbindig gewebte Siebe zum Einsatz. Es waren noch keine geeigneten Verfahren entwickelt, um Siebe anderer Bindungsarten an den Enden miteinander zu verschweißen bzw. sie endlos zu weben. Ein Verschweißen war frühestens mit einem 1927 patentierten Verfahren möglich. In der Folgezeit wurden auf Dreiköpersieben zunächst markierungsunempfindlichere Zeitungsdruckpapiere hergestellt (Abbildung 57). Bevor auch mittelfeine Druck- und Schreibpapiere und später schließlich auch

---

<sup>173</sup> Ist dem ICN-Gutachten; *Doesburg*; 2001 zu entnehmen.

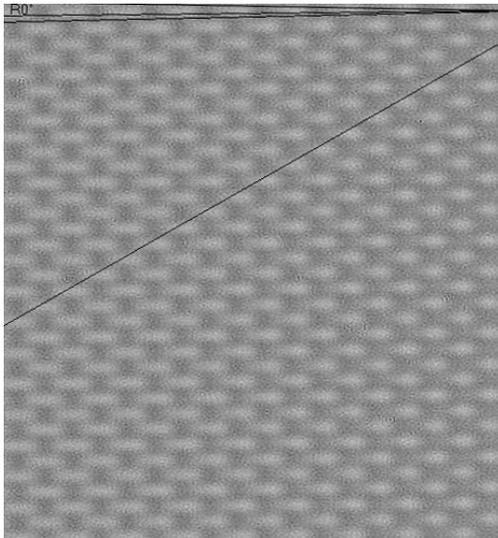


Abbildung 56  
leinwandbindiges Siebgewebe;  
(hier mittels FFT rücktransformiert)

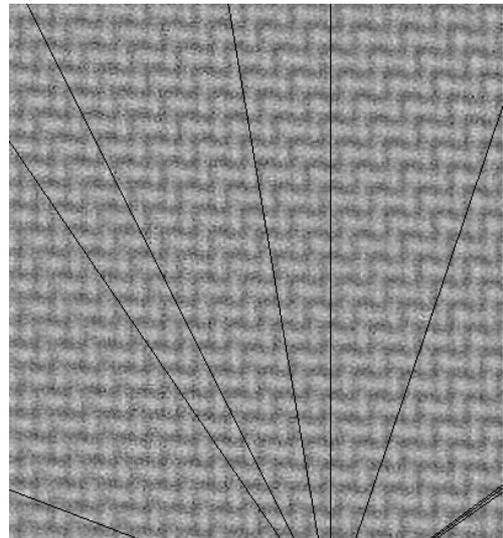


Abbildung 57  
dreikörperbindiges Siebgewebe  
(hier mittels FFT rücktransformiert)

**Schematisch dargestellte Funktionsweise der FFT**

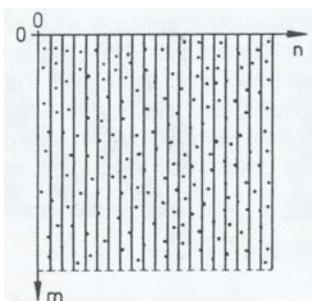


Abbildung 58  
Gesamtmarkierungen im  
Papier; schematische  
Zeichnung

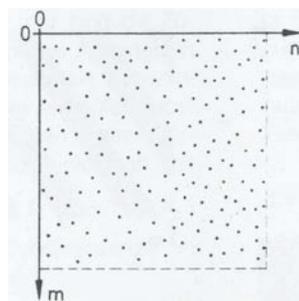


Abbildung 59  
Anteil stochastischer  
Markierungen im Papier,  
schematische Zeichnung

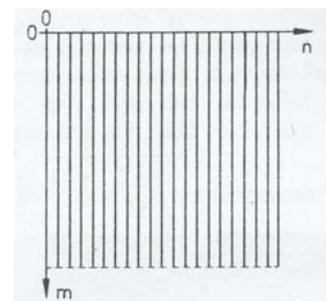


Abbildung 60  
Anteil periodischer  
Markierungen im Papier,  
schematische Zeichnung

Feinpapiere damit hergestellt wurden, sollten noch Jahre vergehen.<sup>174</sup> Nach Meinung von W. Schmidt fanden Schweißnähte sogar erst in den 30er Jahren bei Papiermaschinensieben ihre erstmalige Verwendung.<sup>175</sup> Da Theo van Doesburg allerdings schon 1931 starb, ist seine Urheberschaft bei T 23 wenig authentisch. H. Porck und A.Kardinaal, als beauftragte Gutachter, nahmen aufgrund der Siebstruktur ein Produktionsdatum des Papiers schon zwischen 1930 bis 1940 an.<sup>176</sup> Ihre Argumentation ist schlüssig und fundiert. Jedoch bedarf es in der Zukunft technischer Untersuchungsverfahren, die einerseits noch mehr Markierungen sichtbar und andererseits diese deutlicher (in Sieb, Filz, Egoutteur, etc.) differenzierbar machen. Bei einer solchen Problemstellung bieten sich Analysen mittels Fast Fourier Transformationen (FFT) an.

Der FFT liegt die Feststellung des Franzosen Baron Joseph de Fourier (1768-1830) zu Grunde, die besagt, dass sich jeder regelmäßig wiederkehrende Punkt oder Struktur durch eine Reihe trigonometrischer Funktionen darstellen lässt. Demnach können alle regelmäßig bzw. periodisch wiederkehrenden Punkte/Markierungen, mittels Sinus Cosinus-Funktionen beschrieben werden. Das bedeutet für den Fall der Papierstrukturen, dass alle Strukturen, also auch die von Sieben, Filzen, Egoutteuren etc., in ihrer Gesamtheit erfasst werden (Abbildung 58). Alle unregelmäßigen bzw. stochastischen Punkte (Abbildung 59), z.B. Wolkigkeit, werden bei der Transformation des Durchlichtbildes vom Ortsbereich in den Frequenzbereich eliminiert. Anschließend werden alle regelmäßigen Punkte (Abbildung 60) der Frequenzdarstellung wieder in den Ortsraum zurück transformiert. Dabei wird eine gewebeartige Musterpatrone rekonstruiert (graphische Darstellung), die der regelmäßigen Struktur im Papier des jeweils untersuchten Frequenzbereichs entspricht (Abbildung 56 und 57).

---

<sup>174</sup> Keim, K.; *Sieb und Filz in der Papier-, Pappen-, Zellstoff- und Holzstoffindustrie* (aus der Fachbuchreihe Druck und Papier Band 44) herausgegeben von Erwin Preis; Berlin; 1943; (zukünftig zitiert als: Keim; *Sieb*; 1943) S.23ff.

<sup>175</sup> Schmidt, W.; ‚Das Metallsieb gestern und heute – was ist morgen?‘; in: *Wochenblatt für Papierfabrikation*, Zeitschrift für die gesamte Papier- Pappen- und Papierstoff-Industrie; Organ der Papiermacher-Berufsgenossenschaft Mainz; Biberach an der Riss; Nr. 22; 1983; S.821

<sup>176</sup> Ist dem ICN-Gutachten; *Doesburg*; 2001 zu entnehmen.

Für den Durchbruch der FFT-Analyse von Papieren, welche derzeit u.a. bei Untersuchungen zur Markierungsminimierung von Papierproduzenten verwendet werden, sorgte ein 1988 in *Das Papier* erschienener Artikel ‚Geometrie und Intensität von Siebmarkierungen‘ von Hermann Praast. Diesem folgte dann 1994 seine Dissertation zur *Analyse von Sieb- und Filzmarkierungen mittels FFT*.<sup>177</sup>

Die Arbeitsweise der FFT-Untersuchung lässt sich zunächst in fünf Arbeitsschritte unterteilen:

[1] An mehreren unbeschriebenen Stellen wird das zu untersuchende Papier mit einem handelsüblichen Durchlichtscanner gescannt (Abbildung 61). Das Messfeld hatte hier eine Größe von 2,5 x 2,5 cm. Die zu untersuchenden Strukturen liegen im Wellenlängenbereich von 0-1 mm.

[2] Die Durchlichtaufnahmen, auch Ortsbilder genannt, wurden in den Frequenzraum übertragen und auf diese Weise ein Powerspektrum erstellt (Abbildung 62).

[3] Die zehn intensivsten Markierungen sind erkannt worden (Abbildung 63). In der Regel ist es so, dass nicht immer gleiche Punkte mit gleicher Intensität markieren. Eine Ursache dafür ist die zum Beispiel schon erwähnte Wolkigkeit. Daher ist es erforderlich, an mehreren Stellen zu messen, um so auf statistische Mittelwerte zu kommen.

[4] Die erkannten regelmäßigen Strukturen (Frequenzbereich) werden in den Ortsbereich transformiert (Abbildung 64). Dabei ergibt sich ein Bild, welches der Oberfläche des verwendeten Siebes entsprechen könnte. Die eigentliche FFT-Untersuchung ist damit zwar abgeschlossen, kann aber für andere Frequenzbereiche wiederholt werden.

---

<sup>177</sup> Auszüge daraus erschienen in der Folgezeit ebenfalls in *Das Papier*.

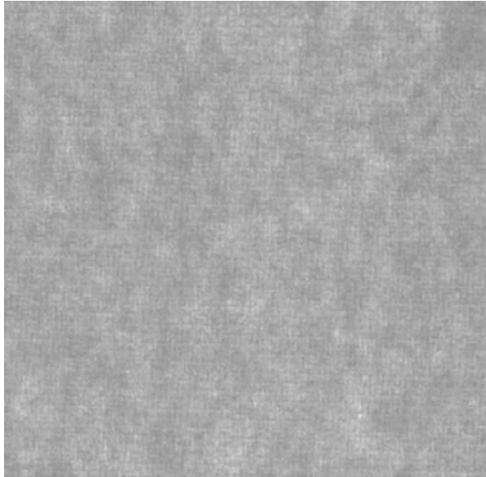


Abbildung 61

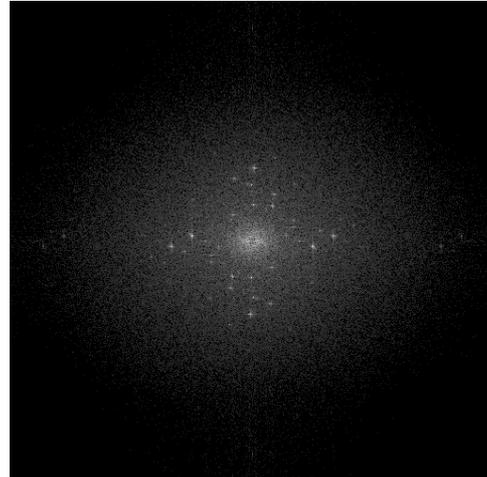


Abbildung 62

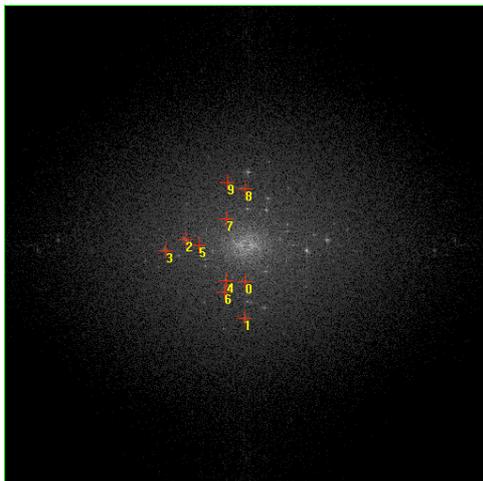


Abbildung 63

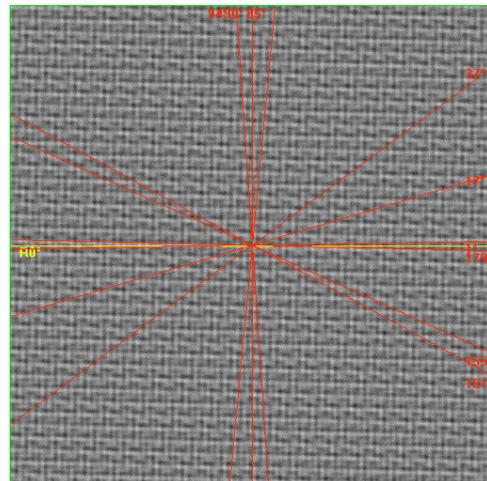


Abbildung 64

Sollen zwei Papiere miteinander bzw. mittels einer "Papiermusterdatenbank" verglichen werden, so kann das mittels der FFT-Frequenzspektren geschehen. Dabei werden Wellenlängen- und die dazugehörigen Winkelinformationen in Tabellenform aufbereitet, verglichen und in einer Datenbank abgelegt.

Um mittels eines solchen Vergleichs Aussagen zur Echtheit bzw. zum Herstellungszeitraum des Papiers machen zu können, ist es notwendig, gesicherte Werke eines Künstlers zum Vergleich heranzuziehen bzw. Daten der Musterzimmer der entsprechenden Papierfabriken in einer Datenbank abgespeichert zu haben.<sup>178</sup>

In naher Zukunft soll es möglich sein, mit den FFT-Papierstrukturanalysen noch einen weiteren Weg zu beschreiten. Ziel künftiger Forschungen muss es sein, die verschiedenen Markierungen von beispielsweise Sieben, Egoutteuren, Filzen, Saugwalzen, Trockensieben, etc. zu differenzieren. Mittels Ausschlussverfahren auf Basis von Patentanmeldungen, ersten Erwähnungen in einschlägigen Fachzeitschriften usw. wäre eine detailliertere Eingrenzung der Produktionszeiträume und ggf. Papierhersteller möglich.

Es bleibt unbestritten, dass jeder Künstler während seiner Schaffenszeit verschiedene Papiere verwendet hat. Diese werden aber höchstwahrscheinlich mehrmals in seinem Gesamtœuvre auftauchen und sich immer von den Papieren eventueller Kopien bzw. Fälschungen unterscheiden. Einschränkend muss aber auch hier festgestellt werden, dass eine eindeutige Zuschreibung an einen Künstler selten nur aufgrund eines komplett rekonstruierten Bogens bzw. des verwendeten Papierblattes erfolgen kann. Ähnlich wie bei allen technischen Untersuchungsmethoden kann eine Zuschreibung nur aufgrund einer kunstgeschichtlichen Analyse erfolgen, die mit den objektiven Tatsachen, die sich aus den verschiedenen Papierstrukturanalysen ergeben haben, untermauert werden. Weiterhin ist noch nicht untersucht, ob die Papierstrukturen der Bearbeitung, gedacht sei hier an Druck- und Aquarelltechniken, bei

---

<sup>178</sup> Einige Papierfabriken archivierten regelmäßig einige Blätter des hergestellten Papiers in sogenannten Musterzimmern. Bei der Firma Zanders existiert daneben noch die „Siebkartei“. Darin sind neben Siebart, Siebhersteller, noch Datum des Wechsel und Menge des hergestellten Papiers vermeldet. Daraus könnten in der Zukunft sicher eine Reihe wichtiger Informationen gewonnen werden.

denen das Papier zunächst sehr feucht bzw. richtig eingeweicht wird, Veränderungen erfahren. Von einer Gefährdung der Papiere bei der FFT-Untersuchung ist jedoch nicht auszugehen, da die Informationsgewinnung an die bisher allgemein übliche Praxis der Wasserzeichenuntersuchung anschließt. So ist aus restauratorischen Gründen beispielsweise in der Pariser Bibliothèque National lediglich die Durchlichtfotografie und die Betaradiographie bei dickeren Papieren als Abbildungsverfahren für Wasserzeichen zulässig.<sup>179</sup> Der entscheidende Nachteil der Betaradiografie (Abbildung 65) ist jedoch, dass der Betastrahler direkt mit dem Papier in Berührung kommt und dieses radioaktiv kontaminiert. Um dies zu umgehen, kämen elektronenradiografische Untersuchungen oder aber die Röntgenfotografie (System Henryk van Hugten) in Frage. Bei der elektronenradiographischen Untersuchung werden die Elektronen einer Bleifolie durch hochenergetische Strahlung angeregt durch das entsprechende Blatt Papier hindurchzutreten und eine mehr oder weniger starke Schwärzung auf einem speziellen Film zu erzeugen (Abbildung 66). Bei der Röntgenfotografie tritt die Röntgenstrahlung durch das zu untersuchende Papier unterschiedlich stark und direkt hindurch. Dabei wird ebenso eine von der Papierstruktur abhängige Schwärzung auf einem entsprechenden Film erzeugt (Abbildung 67). Nachteil der elektronenradiografischen Untersuchung ist, dass das zu untersuchende Blatt immer vollständig im Kontakt mit der Bleifolie sein muss, sonst verschwimmen die Strukturen. Der Vorteil der elektronenradiographischen Untersuchung ist, dass die Strahlung auch geschlossene Bücher durchwandert und diese daher nicht aufgeklappt (was oftmals zu einer Beschädigung des Buchrückens führen kann) sein müssen. Vorteil der Röntgenfotografie ist, dass das Blatt nicht absolut plan sein muss, um eine scharf gezeichnete Struktur zu erzielen. Der Nachteil allerdings ist, dass sich

---

<sup>179</sup> Bockelkamp, M.; ‚Was lehren uns die Wasserzeichen der Pariser Winckelmann-Handschriften‘; in: *IPH-Meldungen*; 7. Jahrgang; Heft 3; 1997; S.41

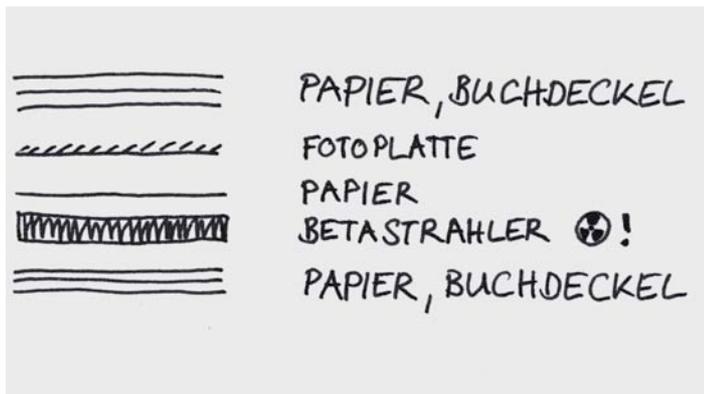


Abbildung 65  
Betaradiographie, schematische Darstellung der Arbeitsweise; Archiv des Autors



Abbildung 66  
elektronenradiographische Untersuchung, schematische Darstellung der Arbeitsweise

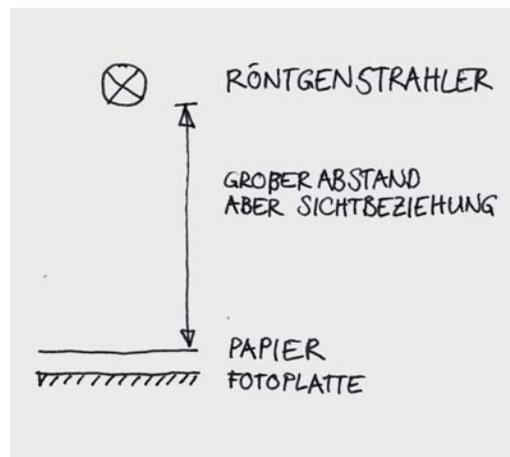


Abbildung 67  
Röntgenfotographie (System H.van Huggen), schematische Darstellung der Arbeitsweise

zwischen der Röntgenquelle und dem Blatt mit der dahinterliegenden Fotoplatte nur Luft befinden darf. Beim anfangs erwähnten Durchlichtscannen mit Licht im sichtbaren Bereich ist sicher mit dem Protest einiger Restauratoren zu rechnen. Es wäre daher zu überlegen, von Anfang an auf die elektronenradiografische Untersuchung oder die Röntgenfotografie zurückzugreifen. Sowohl bei vollständig beschriebenen bzw. bezeichneten als auch bei dickeren Papieren (mehr als 90 g/m<sub>2</sub>) wären selbige Verfahren wegen der zu großen Lichtstreuung ohnehin erforderlich. Erste Versuche mit elektronenradiografischen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Papierstruktur auch bei farbigen, bei gestrichenen, bei bedruckten und bei dickeren Papieren sichtbar gemacht werden kann. Daneben müssen Zwischenschritte, wie beispielsweise das Einscannen der Röntgen- bzw. elektronenradiografischen Aufnahmen wegen eventueller Ungenauigkeiten bei der Übertragung und Moiréeffekte möglichst vermieden werden.<sup>180</sup> Neuigkeiten in dieser Hinsicht sind ebenfalls von der Wasserzeichenforschung zu erwarten, wo gerade ein Röntgenversuchsaapparat mit direkt angeschlossener Bildleseeinrichtung getestet wird. Als ein weiteres Problem der FFT-Papierstrukturanalyse stellte sich heraus, dass bei ein und demselben Probeblatt sowohl bei einer 90° als auch bei einer 180° Drehung unterschiedliche Strukturen erkannt wurden. Da sich meist auch Vorder- und Rückseite strukturell voneinander unterscheiden, müssen für einen Papiervergleich Messungen von acht verschiedenen Probeblattstellungen genommen werden. Um auf statistische Mittelwerte zu kommen, multipliziert sich diese Zahl. Versuche mit beispielsweise farbigem Papier haben ergeben, dass Messfelder von circa 6 x 6 cm notwendig sind, um einerseits eine Differenzierung einschließlich der Saugwalzenstrukturen vornehmen zu können, andererseits war beinahe dieselbe Messfeldgröße notwendig, um beispielsweise eine direkt von einem Papiermaschinensieb gescannte Markierung und eine damit übereinstimmende rücktransformierte Struktur zu erhalten. Sowohl bei kunstgeschichtlichen als auch bei kriminalistischen Fragestellungen, gibt es

---

<sup>180</sup> Zum Moiréeffekt kann es kommen, wenn verschiedene ‚Raster‘, damit sind die regelmäßigen Strukturen im Papier, die Körnung des Röntgenfilms und das Abtastraster des Scanners gemeint, übereinander liegen. Wenn sich diese überlagern, wird daraus eine Fantasiestruktur gebildet, die mit der Papierstruktur nichts mehr zu tun hat.

allerdings nur selten solch große unbeschriebene Messflächen. Ähnlich wie bei Papieren mit mehr als 90 g/m<sub>2</sub> wird man daher in erster Linie (die Betaradiografie scheidet wegen der bleibenden Radioaktivität aus) auf die elektronenradiografische Fotografie bzw. die Röntgenfotografie angewiesen sein. Wie schon erörtert, liegen diesbezüglich bisher zu wenige Erkenntnisse vor, um zu einem abschließenden Urteil zu kommen. Nach der Überwindung aller eben beschriebenen technischen Hürden gilt es die papierindustriegeschichtlich relevanten Daten zur Markierungsunterscheidung zu ermitteln. Diese sind mit Musterzimmern von Papierfabriken und Informationen, die die dazugehörigen Firmenarchive bieten, abzugleichen. Im Rahmen meiner Diplomarbeit muss geschlussfolgert werden, dass die FFT-Papierstrukturuntersuchung bei Echtheits- und Datierungsfragestellungen derzeit noch nicht verlässlich einsetzbar ist. Sind die eben geschilderten Probleme überwunden, bestünde die Möglichkeit, die frühestmögliche Herstellung von Papieren ziemlich exakt zu bestimmen. Aus der Kombination von verschiedenen markierenden Elementen und Papierinhaltsstoffen könnten auch Rückschlüsse auf den Hersteller gezogen werden. Das würde sowohl der Kriminalistik helfen, die Beweislast zu erhöhen als auch Möglichkeiten zum Treffen von Fälschungsaussagen schaffen.