

Luftströmungstrocknung von Papier

Eva Glück, Gerhard Banik, Ernst Becker, Michael Kühner – in Zusammenarbeit mit dem Kreismuseum Grimma

Einleitung:

Die Trocknung von Papier ist einer der wichtigsten Arbeitsprozesse in der Papierrestaurierung. Wenn man von der besonderen Trocknungsproblematik nach Flutkatastrophen absieht, steht ein kontrollierter Trocknungsprozess immer am Ende einer restauratorischen Behandlung, in die Flüssigkeiten, in der Regel Wasser, involviert sind. Dazu gehört die kontrollierte Befeuchtung von Blättern zur Ermöglichung ihrer Planlegung, ebenso wie die Nassbehandlung in Bädern zur Reinigung oder Entsäuerung gealterter Papiere oder zu ihrer chemischen Stabilisierung in Fällen von Tintenfraß. Prinzipiell wird durch den Begriff Trocknung die Reduzierung des physikalisch gebundenen Wassers im Papier beschrieben. Sie erfolgt durch Verdunstung. Damit wird nach einer Befeuchtung der Wassergehalt in Papier von ca. 18 % bis maximal 25 % auf eine Gleichgewichtsfeuchte reduziert, die, bezogen auf das Trockengewicht eines Papiers, je nach Papiertyp zwischen 5 % und 9 % liegt. Nach einer Nassbehandlung im Bad liegt der Wassergehalt von Papier mit ca. 50 % erheblich höher, d. h. durch den Trocknungsprozess müssen bis zu 40 % Wasser schonend aus dem Faservlies entfernt werden.

Die Trocknungstechnik ist entscheidend für die Wiederherstellung der mechanischen Eigenschaften von Papier nach einer Nassbehandlung. Gleichzeitig muss die Bewahrung der Integrität von Papier durch die Vermeidung von Spannungen während des Trocknungsprozesses garantiert werden. Nicht zuletzt werden signifikante Merkmale eines Papiers, wie u. a. seine Oberflächenmorphologie oder seine Dimension, durch die Trocknungstechnik entscheidend beeinflusst (Brecht 1958). Die Trocknung muss daher als ein die Qualität der Behandlung maßgeblich bestimmender Schritt eines restauratorischen Eingriffs in der Papierrestaurierung angesehen werden.

Interessanterweise wird aber gerade der Trocknung in der Fachliteratur und in der konservierungswissenschaftlichen Forschung bisher nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Die Arbeiten von Sugarman und Vitale (1992), Watkins (2002) und Mentjes (2006) stellen viel versprechende Ansätze dar. Bisher wurde aber der Erfordernis nach einer grundlegenden Darstellung der Prinzipien von relevanten Trocknungstechniken in der Papierrestaurierung und deren jeweiligen Möglichkeiten und Grenzen in der Praxis nicht nachgekommen.

Papier Trocknung in der Restaurierung:

Der Wassergehalt von Papier steht im Gleichgewicht mit der relativen Feuchte der umgebenden Luft bei einer bestimmten Temperatur und einem bestimmten Druck. Bei Normalbedingungen, d. h. einer Temperatur von 23°C, einem Luftdruck von 760 Torr (1 atm) und einer relativen Feuchte von 50 %, liegt die Gleichgewichtsfeuchte von Papier im Durchschnitt bei etwa 6 %. Bei diesen »normalen« Bedingungen muss ein feuchtes Papier so lange Wasser als Wasserdampf abgeben, bis es seine Gleichgewichtsfeuchte erreicht hat.

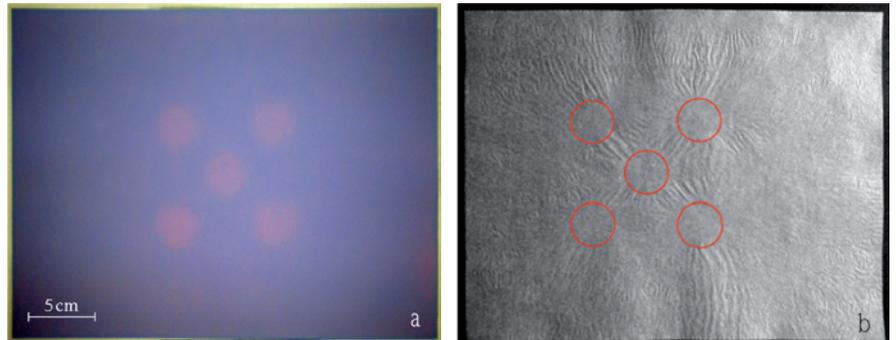


Abb. 1a und 1b

Physikalisch korrekter ist es, den Partialdruck des Wasserdampfs im Luftraum und den Partialdruck des Wasserdampfs im Porensystem des Papiers für die Betrachtungen heranzuziehen. Ein Druckgefälle in die eine oder andere Richtung ist die treibende Kraft für das Bestreben von Papier und anderer Materialien auf Cellulosebasis, Wasser abzugeben (Trocknung) oder aufzunehmen (Befeuchtung) und mit der Umgebung ein Feuchte-Gleichgewicht einzustellen.

Qualitätsanforderungen an die Trocknungsmethode:

Jede wässrige Behandlung geht mit einer Veränderung der charakteristischen Papierstruktur einher, da ein Großteil der bei der Papierherstellung im Material fixierten Wasserstoffbrückenbindungen in und zwischen den Fasern gelöst wird. Der Eintrag von Wasser hat eine Abnahme der Papierfestigkeit und eine Veränderung der Dimensionen und Oberflächentextur zur Folge. Durch die Trocknungsmethodik wird die Rückführung des originalen Papiercharakters maßgeblich beeinflusst und somit die Qualität des Behandlungsergebnisses bestimmt. Eine „freie“ Lufttrocknung entspricht dem Trocknen von Wäsche an der Leine im Freien. Aufgrund der inhomogenen Masseverteilung im Papiervlies geht die freie Lufttrocknung mit einer ungleichmäßigen Wasserabgabe einher, die sich in Verwellungen des Papiers manifestiert (Brecht 1958). Eine entscheidende Anforderung an das Trocknungsergebnis in der Papierrestaurierung – die Planlage des Objekts – kann nicht erfüllt werden. Besonders wichtig ist daher die Gleichmäßigkeit der angewandten Trocknungsprozesse, denn jede Ungleichmäßigkeit führt zu Verwerfungen des Papiers (Abb. 1). Alle Trocknungsmethoden sind mehr oder weniger mit dem Risiko der Ausbildung von Feuchtigkeitsgradienten innerhalb eines Papierblattes verbunden. Die Risiken lassen sich jedoch durch einfache Maßnahmen reduzieren oder weitgehend ausschließen.

Abb. 1a und 1b: Darstellungen einer ungleichmäßigen Papiertrocknung bei der Kontakttrocknung zwischen Löschkartons an einem Cobalt(III)-chlorid – Indikatorpapier (1a) und einem Pergaminpapier (1b): Das Cobalt(III)-chlorid-Indikatorpapier bleibt in Bereichen ohne Kontakt zum sorptionsfähigen Löschkarton länger feucht (rosa) als in den Bereichen mit Oberflächenkontakt (blau), d. h. die Bereiche ohne Kontakt trocknen langsamer. Am Pergaminpapier wird deutlich, dass die analog durchgeführte, ungleichmäßige Trocknung mit einer ungleichmäßigen Schrumpfung des Papiers einhergeht. Dies hat Verwerfungen zur Folge: in den langsamer getrockneten Bereichen (innerhalb der roten Umrandung) liegt das Papier planer als in denen, die schneller getrocknet sind (Versuch nach Brecht 1958).

Folgende Qualitätsanforderungen werden an eine Trocknungsmethode in der Papierrestaurierung gestellt:

- Die Planlage des Objekts soll erreicht werden. Um dies zu erreichen, muss die Wasserabgabe aus dem Objekt so gleichmäßig wie möglich erfolgen.
- Die ursprüngliche Oberflächentextur und die Dimensionen des Papiers sollen erhalten bleiben.
- Druck- und Zeichenmedien sollen in ihrem Charakter und Relief erhalten bleiben.
- Die Methode soll ökonomisch sein.

Papierrestauratoren haben Trocknungstechniken entwickelt, mit denen sich Verwerfungen im Papier infolge einer ungleichmäßigen Wasserabgabe vermeiden lassen. Das geschieht unter anderem bei der Trocknung unter Zugspannung oder mittels der so genannten Kontakt-trocknung. Dabei wird das feuchte Papier in einen Trocknungsstapel zwischen hygroskopische Hilfsmaterialien, z. B. Löschkarton oder Wollfilze, eingelegt, so dass ihm, meist unter leichtem Druck, langsam Wasser entzogen wird. Wasser wird so durch Kapillarkräfte und Diffusion an die trockenen Kontaktmaterialien abgegeben. Die Kontaktmaterialien auf Cellulose- (Karton) oder Proteinbasis (Wollfilz) ziehen Wasser aus dem feuchten Papier ab, wobei ihre eigene Materialfeuchte ansteigt. Der Prozess verläuft langsam. Der Wasseraustausch erfolgt so lange, bis sich ein Gleichgewicht zwischen dem Wassergehalt des Trocknungsguts und dem des Kontaktmaterials eingestellt hat. Somit kommt der Trocknungsprozess zum Stillstand. Um die Trocknung weiterzuführen, muss das entstandene Gleichgewicht wieder gestört und ein neuer Konzentrationsgradient erzeugt werden. Das geschieht, indem in regelmäßigen Zeitabständen die feucht gewordenen Kontaktmaterialien gegen trockene ausgetauscht werden. Es handelt sich um einen diskontinuierlichen Trocknungsprozess, der Arbeitskraft bindet.

Die an der Luft trocknenden Kontaktmaterialien erleiden bei dieser Technik eine Verformung. Das technische Problem der ungleichmäßigen Trocknung wird also vom Objekt auf ein Hilfsmaterial transferiert, dessen Verschleiß in Kauf genommen wird (**Abb. 2, Seite 4**). Nach Sugarman und Vitale (1992) begünstigt zudem eine moderate Trocknungsgeschwindigkeit generell den gleichmäßigen Verlauf einer Kontakt-trocknung.

Luftströmungstrocknung:

Bei der Luftströmungstrocknung wird eine Gleichgewichtseinstellung zwischen dem Wassergehalt des Trocknungsguts und dem des Kontaktmaterials so lange verhindert, bis das Trocknungsziel erreicht ist. Dazu wird in den Aufbau eines Trocknungsstapels ein Material integriert, das über offene Kanäle verfügt, durch die Luft strömen kann (Shure 2000, Minter 2002). Es kann sich hierbei um Wellkartons, aber auch um synthetische Gewirke mit Luftkanälen handeln (Schopfer 2004). Mit einer Luftförderanlage wird kontinuierlich Luft durch diese Kanäle bewegt. Im Trocknungsverlauf wird das im Papierobjekt enthaltene Wasser zur Gleichgewichtseinstellung zunächst an die Kontaktmaterialien und von diesen weiter an den Wellkarton abgeben.

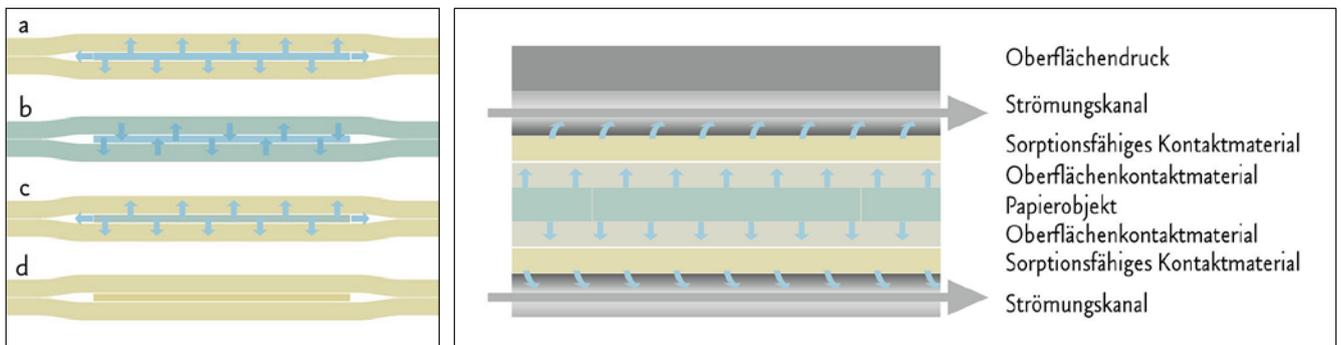


Abb. 2a – d, Abb. 3

Über die Wände der Kanäle wird es dann als Wasserdampf an die durchströmende trockene Luft abgegeben (Abb. 3). Da stets ein Gefälle im Wasserdampfpartialdruck zwischen der Luft und der Wand des Strömungskanals besteht und außerdem die Luft kontinuierlich den Kanal durchströmt, muss Wasser ebenso kontinuierlich aus der Wand verdampfen und abgeführt werden. Das Feuchtgleichgewicht zwischen Papier und Kontaktmaterialien im Trocknungsstapel wird so permanent gestört. Zu seiner Wiederherstellung muss Wasser aus dem Inneren des Stapels – vom Objekt – an die Oberfläche der Strömungskanäle wandern, wo es dann wieder verdampft und abgeführt wird. Dieser Vorgang setzt sich so lange fort, bis ein Gleichgewicht zwischen dem Wasserdampfpartialdruck der bewegten Luft und dem im Porensystem der Kontaktmaterialien eingestellt ist. Dann ist auch das Trocknungsziel erreicht. Auf diese Weise kann eine effiziente, kontinuierliche und sowohl im Papierquerschnitt als auch im Papierformat gleichmäßige Trocknung erfolgen. Die Trocknung muss nicht wie bei der traditionellen Kontakt-trocknung mehrfach unterbrochen werden, um die feuchten Materialien auszutauschen. Dadurch lässt sich Arbeitskraft einsparen, und zudem wird der Verbrauch an Hilfsmaterialien deutlich reduziert.

Abb. 2a – d: Prinzip der Kontakt-trocknung zwischen Löschkartons

Das feuchte Objekt (blau) wird im Trocknungsstapel zwischen trockene Löschkartons (gelb) gelegt (2a). Solange ein Feuchtigkeitsgradient zwischen Objekt und Löschkartons besteht, wird Wasser aus dem Objekt in die Löschkartons transferiert (2a), die Löschkartons müssen mehrmals ausgewechselt werden, um den Gleichgewichtszustand immer wieder zu stören (2b und 2c), bis das Trocknungsziel erreicht ist (2d). (Banik, Brückle, Paper and water: A guide for conservators, nach Fig. 13.19, in Druck).

Abb. 3: Prinzip der Luftströmungstrocknung

Das feuchte Objekt (blau) wird zum Schutz der Oberfläche zwischen Kontaktmaterialien, z. B. Hollytex® (grau), gelegt. Es wird so im Trocknungsstapel zwischen Löschkartons (gelb) und dem mit Strömungskanälen ausgerüsteten Material (grau) platziert. Solange ein Feuchtigkeitsgradient zwischen dem Objekt und der durch die Kanäle strömenden Luft besteht, wird Wasser aus dem Objekt über die Löschkartons an den Luftstrom abgegeben (Banik, Brückle, Paper and water: A guide for conservators, nach Fig. 13.25, in Druck).

Funktionsmodell einer Luftströmungstrocknungsanlage:

Zur Untersuchung der Methode wurde ein strömungstechnisches Funktionsmodell entwickelt. Dieses beschreibt eine Luftströmungstrocknungsanlage als thermodynamisches System, dessen technischer Parameter der Luftströmung und dessen Stoff- und Wärmebilanz im Trocknungsverlauf berechnet werden können. Besondere Berücksichtigung erfährt hierbei die Luftturbulenz, die durch die Reynoldszahl »Re« ausgedrückt wird. Um einen gleichmäßigen Wasserdampftransport entlang der Strömungsstrecke zu gewährleisten und somit Feuchtigkeitsgradienten innerhalb des Systems zu vermeiden, muss die Luftströmung möglichst turbulent sein.

Die kritische Reynoldszahl unter Raumbedingungen für turbulente Strömung beträgt 2320. Generell gilt, dass Strömungen mit einer Reynoldszahl kleiner 0 laminar sind. Der Bereich zwischen 0 und 2320 wird als Übergangsbereich bezeichnet, in dem die laminare Strömung in eine turbulente übergeht. In Vorversuchen wurden verschiedene Trocknungstapel an eine Luftförderanlage angeschlossen, deren Volumendurchsatz zwischen ca. 135 m³/h und 270 m³/h variiert werden konnte. Während des Trocknungsverlaufs wurden die Temperatur und die relative Feuchte der Luft am Luftein- und Luftaustritt des Stapels elektronisch aufgezeichnet. Es wurden zwei verschiedene Stapelaufbauten getestet, ein Stapel bestehend aus überwiegend Kartonmaterialien und einer aus synthetischen Materialien. (*Tabelle 1*)

Stapelaufbau Kartonmaterialien	Stapelaufbau synthetische Materialien
Wellkarton	Abstandsgewirke (Polypropylen)
	Versteifende Zwischenlage (Polypropylen)
Löschkarton	Polypropylen-Vlies
Hollytex®	Hollytex®
Papierobjekt	Papierobjekt
Hollytex®	Hollytex®
Löschkarton	Polypropylen-Vlies
	Versteifende Zwischenlage (Polypropylen)
Wellkarton	Abstandsgewirke (Polypropylen)

Tabelle 1: Aufbau der Teststapel aus Kartonmaterialien (links) und aus synthetischen Materialien (rechts).

Um den Einfluss der Luftströmungsgeschwindigkeit auf das Trocknungsergebnis einschätzen zu können, wurden zunächst Referenzen mittels herkömmlicher Kontakttrocknung hergestellt. Als Probenpapiere diente ein historisches Büttenpapier und ein holzhaltiges mit Harz-Alaun geleimtes Maschinenpapier. Die Vorbehandlung umfasste ein Wässerungsbad und das Abgautschen der Papiere zwischen Polypropylen-Vliesen unter leichtem Druck. Die anschließende Kontakttrocknung der Papiere im Stapel dauerte 4 Tage. Die Löschkartons mussten während der Trocknungszeit 5 mal gewechselt werden.



Abb. 4

Der Druck wurde jeweils so gewählt, dass die Planlage erreicht und die ursprünglichen Dimensionen und die Oberflächenstruktur der Papiere weitestgehend erhalten blieben. Dieser Druck betrug beim Büttenpapier ca. $0,014 \text{ N/cm}^2$ und beim Maschinenpapier ca. $0,25 \text{ N/cm}^2$.

Mit einer Luftströmungstrocknung im Wellkartonstapel können nach nur 4 h vergleichbar gute Trocknungsergebnisse erzielt werden wie mit der traditionellen Kontakttrocknung bei einer Trocknungsdauer von 4 Tagen (Abb. 4).

Voraussetzung ist, dass der Volumendurchsatz der Luft bei einer Lufttemperatur von ca. 20°C und 30% relativer Feuchte – den herrschenden Umgebungsbedingungen während der Versuche – unter $270 \text{ m}^3/\text{h}$ (Re ca. 730) liegt. Bei einer höheren Strömungsgeschwindigkeit werden Feuchtigkeitsgradienten sowie Spannungen induziert, die zu Verwerfungen am Papier führen.

Im Stapel aus synthetischen Materialien waren die Probenpapiere bei gleichen Bedingungen bereits nach 1,5 h trocken. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass eine Wasserbindung durch Sorptionskräfte wie beim Löschkarton im Polypropylen-Vlies aufgrund des unpolaren Materialcharakters nicht stattfinden kann. Die Wasserabgabe aus dem Papier erfolgt daher in kürzerer Zeitdauer, die für eine gleichmäßige, spannungsfreie Trocknung nicht ausreichend war. Eine Verlangsamung der Trocknung wurde durch die Befeuchtung der einströmenden Luft auf eine relative Feuchte von ca. 55% bewirkt. Die Trocknungsdauer wurde hiermit auf insgesamt 4 h verlängert. Trotzdem wurde eine mit der Referenz vergleichbare Planlage der Papiere nicht ganz erreicht. Es zeigte sich jedoch, dass die Trocknung in diesem System durch eine gezielte Konditionierung des Lufteinstroms entscheidend gesteuert und optimiert werden kann.

Abb. 4: Stapelaufbau einer Luftströmungstrocknungsanlage mit Wellkartonlagen, System KLUG-CONSERVATION (Banik, Brückle, Paper and water: A guide for conservators, nach Fig. 13.26, in Druck).



Abb. 5a und 5b

Anwendung:

Die Methode der Luftströmungstrocknung wurde anlässlich der Restaurierung eines um 1850 verlegten Kinderbuchs aus dem Bibliotheksbestand des Kreismuseums Grimma (Sachsen) angewendet. Das Buch war eines der zahlreichen Sammlungsgegenstände des Museums, die durch das starke Hochwasser im Sommer 2002 schwer beschädigt worden waren. Es war deformiert, stark verschmutzt und wies vor allem am Buchblock, bestehend aus 41 Velinpapier-Blättern mit Radierungen und begleitendem Textdruck, starke Wasserränder und Stockflecken auf (Abb. 5a). Durch die wässrige Behandlung der Blätter und eine anschließende Lichtbleiche konnten Schmutzablagerungen und Verfärbungen weitgehend entfernt werden. Anschließend wurden jeweils 13 bis 14 Blätter gleichzeitig mittels Luftströmungstrocknung im Stapel aus Kartonmaterialien bei einem Volumendurchsatz von ca. 135 m³/h (Re ca. 730) und einem Druck von ca. 0,014 N/cm² getrocknet. Um sicherzustellen, dass die Trocknung gleichmäßig verläuft, wurden zwei Lagen Löschkarton als für Wasser sorptionsfähige Zwischenlage eingesetzt, wodurch sich die Trocknungszeit auf insgesamt 5 h verlängerte. Die Trocknungsergebnisse waren gut (Abb. 5b).

Abb. 5a und 5b: Flutgeschädigtes Kinderbuch »Das Kind, von der Wiege bis zur Schule«, Andreas und Friedrich Perthes, Hamburg und Gotha (um 1850), Kreismuseum Grimma, Inv.-Nr. J 4. 5, Halbleineneinband mit 41 Blatt im Format 22 x 14,5 cm, Buchblock aus Velinpapier mit einem radierten Titelblatt (Ansicht) und 19 radierten Illustrationen von Heinrich Justus Schneider sowie 24 begleitenden Textseiten von Johann Wilhelm Hey, vor der Restaurierung (a) und nach der Restaurierung (b). Die Blätter des Buchblocks wurden nach der Nassbehandlung zur Entfernung der Verfärbungen und Schmutzablagerungen mittels Luftströmungstrocknung im Stapel aus Kartonmaterialien getrocknet und gleichzeitig plan gelegt.

Zusammenfassung:

In der Papierrestaurierung wird die Luftströmungstrocknung meist vereinzelt zur Planung von großformatiger, künstlerischer Graphik eingesetzt. Eine wichtige Anwendung erfährt sie derzeit auch als abschließender Behandlungsschritt bei der Anfäse rung von Schriftgut in der Mengenrestaurierung am Institut für Erhaltung von Archiv- und Bibliotheksgut (IFE) in Ludwigsburg (Kieffer 2007). Sie kann als standardisierbare und ökonomische Methode eingeschätzt werden, mit der ein qualitativ hochwertiges Trocknungsergebnis erzielt wird. Auf Nassbehandlungen in der Papierrestaurierung ist sie grundsätzlich übertragbar, vor allem auf Anwendungen, in denen große Stückzahlen bearbeitet werden, wie zum Beispiel die wässrige Papierentsäuerung oder die Trocknung von flutgeschädigtem Sammlungsgut.

Literatur:

Banik, G., Brückle, I.

Paper and water: A guide for conservators, Butterworth Heinemann, Oxford, im Druck.

Brecht, W.

Beating and hygrostability of paper, in: Fundamentals of papermaking fibres, Transactions of the symposium held at Cambridge, September 1957, Fancis Bolam (ed.), British Paper and Board Makers Association, Kenley, UK (1958): 241–262.

Glück, E.

Luftströmungstrocknung von Papier – Erarbeitung eines Funktionsmodells zur Anwendung in der Papierrestaurierung, unpublizierte Diplomarbeit, Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart (2005).

Kieffer, A.

Strömungstrocknung, in: Arbeitsblätter des Arbeitskreises Nordrhein-Westfälischer Papierrestauratoren 11 (2007): 35–39.

Mentjes, M.

Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Papier bei der Anwendung von Trocknungstechniken aus der Papierrestaurierung, Weiße Reihe des Instituts für Museumskunde der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart, Band 22, Gerhard Banik, Volker Schaible (Hrsg.), Anton Siegl, München (2006).

Minter, B.

Water damaged books: Washing intact and air drying – A novel (?) approach, AIC, The Book and Paper Group Annual 21 (2002): 105–109.

Shure, B.

Chine Collé: A printer's handbook, Crown Point Press, San Francisco (2000): 81–88.

Sugarman, J. E. und Vitale, T. J.

Observations on the drying of paper: Five drying methods and the drying process, JAIC 31 (1992): 175–197.

Schopfer, J.

Persönliche Mitteilung (2004). Western Regional Paper Conservation Laboratory, Fine Arts Museums of San Francisco, California Palace of the Legion of Honor, Lincoln Parc, 100 34th Avenue, San Francisco, CA 94121-1693, USA.