

Physik und Anwendung elektrischer Infrarotstrahler

Trocknung hydrophiler Substrate und wässriger Dispersionen auf deren Oberfläche

Die Trocknung von Papier und seinen Beschichtungen ist der energieaufwendigste Vorgang der Papiererzeugung. Die Trocknung erfolgt entweder durch Konduktion, Konvektion oder Radiation. Letztere ist die Teuerste der drei Energien, aber unter bestimmten Randbedingungen die Energie der Wahl, vor allem wenn man Trockengut trocknen möchte, das an der Oberfläche feucht ist, so dass die Konduktion – Trocknen auf einem Trockenzylinder – ausgeschlossen ist. Wir konzentrieren uns hier auf die Strahlung. Diese kann leicht dekarbonisiert werden und die Effizienz kann im Vergleich zu heutigen Anwendungsszenarien gesteigert werden. Manche Fakten hierzu sind kaum bekannt, diese haben aber einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität des fertigen Papiers sowie auf dessen Rohstoffkosten. Autor: Wolf Heilmann

Wir beleuchten einige der im Detail nicht bekannten Fakten, um dem Papiermacher die verschiedenen Möglichkeiten aufzuzeigen, sein Papier optimal zu produzieren. Beim Trocknen von Strichen – insbesondere funktionalen Strichen – ist die Regelung der Trocknung ausschlaggebend. Wobei eine Temperaturführung in Maschinenrichtung nicht zielführend ist, vor allem, weil nur die Temperatur der Oberfläche erfasst werden kann, nicht die der initialen Sedimentschicht. Relevant hingegen ist eine Temperaturführung in z-Richtung.

Bei der Trocknung muss immer beachtet werden, dass über zwei Drittel der Energie zur Papiererzeugung darauf verwandt werden, dass Papier und den Strich zu trocknen. Die Strahlung ist dabei die teuerste Energie, weshalb der Papiermacher sich bewusst sein muss, wie er diese optimal einsetzt. Die in der Papierindustrie eingesetzte Radiation ist die Infrarotstrahlung, deren Wellenlänge an das sichtbare Licht anschließt und sich über ein breites Wellenlängenspektrum ausbreitet. Strahlung unterschiedlicher Wellenlängen wirkt sich auch unterschiedlich auf die Trocknung aus.

Viele dieser Fakten sind auch gültig bei der Trocknung, Profilierung und Vorwärmung von Substraten. Diese physikalischen Zusammenhänge stellen wir in diesem Artikel dar.

1 Trocknung

Die Trocknung in der Papierindustrie ist gleichzeitig einfach und sehr schwer. Lösungsmittel der Wahl ist Wasser. Andere Lösungsmittel verwenden wir in der Papiererzeugung nicht, höchstens in nachfolgenden Schritten wie beim Drucken. Wasser unterscheidet sich von vielen anderen Lösungsmitteln, weil es an das Trockengut gebunden ist. Diese Wasserstoffbrückenbindung zu den Fasern ebenso zu anderen Wassermolekülen muss zusätzlich zur Verdampfung überwunden werden.

Wir müssen uns also auf die Interaktion zwischen Wassermolekülen und Fasern bzw. Streichfarbkomponenten konzentrieren. Dies erreichen wir über Anregung der Wasserstoffbrückenbindung sowie Hydroxylgruppen.

Die Anregung erreichen wir über den Energieeintrag. Dieser muss groß genug sein, um Wassermoleküle voneinander zu trennen und diese auch von den Hydroxylgruppen abzutrennen. Die Trocknung ist jedoch erst beendet, wenn wir das Wasser verdampft, also aus



Trocknung mit eNIR-Strahlern **Vertretung:** wolf heilmann GmbH **Kontakt:** sales@wolfheilmann.eu

dem Trockengut herausbewegt haben. Dabei müssen wir auch berücksichtigen, wohin sich das Wasser bewegen muss, um möglichst wenig Energie aufwenden zu müssen.

Trocknung ist also immer zweistufig - und die Energieeinbringung ist wesentlich dafür verantwortlich, wie und wo das Wasser das Trockengut verlässt. Hier sollten wir mit der Physik arbeiten, nicht gegen sie.

1.1 Trocknungsarten beim Papiermachen

Dem Papiermacher stehen verschiedene Werkzeuge zur Verfügung, die es ihm ermöglichen, das Wasser aus dem Papier zu entfernen. In der Siebpartie ist noch viel Wasser vorhanden. Nur eine sehr geringe Menge Wasser ist über Wasserstoffbrückenbindung an die Fasern gebunden. Hier reichen Schwerkraft, Vibrationen und Zentrifugalkraft, um den größten Teil des Wassers zu entfernen, 90 % bis über 99 % der Menge Wasser, die mit den Fasern aus dem Stoffauflauf kommt.

In der Pressenpartie wird überschüssiges, nicht gebundenes Wasser ausgepresst - je nach Papiermaschine und Papiersorte werden hier noch einmal 0,2 % bis 8 % des gesamten Wassers ausgepresst. Das Papier hat dann aber noch 40 % bis 60 % Wasser. Dieses ist fest an die Fasern gebunden, so dass es weder durch Schwerkraft noch durch Pressen entfernt werden kann.

Für diesen letzten Schritt werden rund 90 % der gesamten für die Entwässerung verwandten Energie benötigt - um 0,2 % bis 1,5 % der Gesamtwassermenge zu entfernen, die im Stoffauflauf auf das Sieb gebracht wurde.

Für die Kostenbetrachtung der Papiererzeugung ist dieser letzte Rest Wasser entscheidend. Im Grunde benötigt das Wasser jetzt einen anderen Grund, das Papier zu verlassen. Die erste Wahl ist thermische Energie: wird das Wasser zum Kochen gebracht, verdampft es und verlässt das Trockengut.

Der Papiermacher verwendet vor allem dampfbetriebene Trockenzylinder. Diese übertragen durch Wärmeleitung - Konduktion - ihre Energie auf die Oberfläche des Papiers und erwärmen die Tiefe des Papiers ebenfalls durch Konduktion. Die ersten Zylinder bringen das Papier auf Verdampfungstemperatur. Sobald die Verdampfung beginnt, bleibt die Temperatur der Oberfläche der Zylinder und des Papiers gleich - Erwärmung durch Energiezufuhr vom Zylinder sowie Abkühlung durch Verdampfungsenthalpie halten sich die Waage.

Bei der Trocknung durch Trockenzylinder darf man zwei Fakten nicht aus den Augen lassen: die Energie wird über die Oberfläche eingetragen. Geschieht dies zu schnell, kann bei schwereren Grammaturen die Oberfläche zu schnell trocknen und wird dadurch zum Thermoisolator. Dann benötigt man erheblich mehr Energie zur Trocknung. Gleichzeitig entsteht das Risiko der Lagentrennung im Inneren des Substrats. Am Ende der Trockenpartie muss dann überhitzt werden, um die Feuchtigkeit aus der Mitte der Bahn durch die übertrocknete Oberfläche zu bringen. Der zweite wichtige Punkt: man muss dem Dampf zwischen den Zylindern Raum geben, um das Substrat verlassen zu können. Grundsätzlich ist die Zylindertrocknung die effizienteste Art, das Wasser von den Fasern zu trennen.

1.2 Trocknung des Strichs

Trockenzylinder sind aber - bis auf eine Ausnahme, dem Gussstreichen - nur geeignet, relativ trockene Substrate zu trocknen. Für Strichtrocknung sind sie nicht anwendbar. Hier muss der Papiermacher auf Heißluft - Konvektion - und Strahlung - Radiation - zurückgreifen. Der feuchte Strich wird von der Kontakttrocknung verletzt, wodurch unerwünschte Oberflächenmarkierung entsteht. Die Strichtrocknung muss daher zuerst kontaktlos stattfinden.

Bei der Strichtrocknung muss berücksichtigt werden, dass das Substrat hydrophil und sehr saugfähig ist. Die flüssige Phase des Strichs wird sich durch die Kapillarkräfte des Substrats sowie der Wasserstoffbrückenbindung bevorzugt Richtung Substrat bewegen. Dies ist zum einen schädlich für die Trocknung, weil wir dann erheblich mehr Energie benötigen, um die Bewegung der flüssigen Phase in das Substrat abzubremesen, um die flüssige Phase von den Fasern zu lösen, indem wir die Wasserstoffbrückenbindung überwinden, und um die flüssige Phase wieder an die Oberfläche zu beschleunigen. Wir vergeuden somit wertvolle Energie, wenn wir die flüssige Phase nicht von Anfang an Richtung Oberfläche bewegen.

Zum anderen schaden wir der Qualität und unserem Geldbeutel: der Kunde zahlt nur für den Strich auf der Oberfläche, nicht für Strichbestandteile im Substrat. Der Papiermacher versucht durch Steuerung der Erwärmung des Strichs in Maschinenrichtung die Trocknung so zu steuern, dass möglichst wenig Migration in das Substrat stattfindet. Allerdings führt dies meistens zu sehr langen Trockenstrecken. Wenn die Trocknung korrekt durchgeführt wird, ist die Steuerung nach Oberflächentemperatur in Maschinenrichtung irrelevant.

Wichtig ist hingegen die Steuerung der Trocknung in z-Richtung: die initiale Sedimentschicht muss auf jeden Fall wärmer sein als die Oberfläche. Anders lässt sich das Wasser nicht motivieren, sich Richtung Oberfläche zu bewegen.

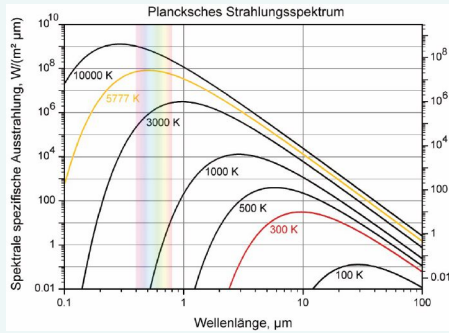
1.2.1 Heißlufttrocknung

Die Trocknung des Trockengutes kann sehr energieeffizient mit Heißluft erreicht werden. Die Kosten hierfür sind günstiger als die Trocknung mit Zylindern, allerdings wird eine sehr viel größere Trockenstrecke benötigt.

Man bläst sehr trockene, heiße Luft auf das Trockengut. Die relative Luftfeuchte ist so niedrig, so dass ihr partieller Dampfdruck des Wassers niedrig ist. Im Trockengut ist er höher, so dass sich das erwärmte und verdampfte Wasser zur Oberfläche bewegt und von der Heißluft aufgenommen wird. Die Heißluft stört dabei turbulent die laminare Grenzschicht, so dass viel Wasser in die Luft absorbiert werden kann. Gleichzeitig wird bei modernen Heißlufttrocknern die gesättigte Luft abgeführt und durch neue, trockene ersetzt, so dass der Gradient im partiellen Dampfdruck immer Richtung Oberfläche weist.

Der große Nachteil der Heißluft gegenüber der Strahlung: wie die Zylinder erwärmt sie nur die Oberfläche. Die Erwärmung tieferer Schichten, sei es Strich oder Papier, erfolgt durch

Abb. 1: Planck'sches Strahlungsspektrum, mit Temperaturen gemäß Stefan-Boltzmann und Wien'schem Verschiebungsgesetz



Wärmeleitung innerhalb des Trockengutes. Deshalb ist eine präzise Steuerung des Energieeintrages in Maschinenrichtung erforderlich.

An der Oberfläche muss weniger Energie durch Konvektion in den Strich (oder auch das Substrat) eingebracht werden, als durch Konduktion in die Tiefe des Materials weitergeleitet wird. Nur so wird sichergestellt, dass die Oberfläche nicht übertrocknet, verfilmt oder verhornt und dadurch zum Thermoisolator umgewandelt wird.

1.2.2 Trocknung durch Strahlung

Die Infrarotstrahlung – Radiation – ist die einzige Art der Wärmeübertragung in der Papiererzeugung, die tief in das Trockengut eindringen kann. Sie regt die Wasserstoffbrückenbindung und die Hydroxylgruppen an und führt so zur Erwärmung des Materials. Der Nachteil der Infrarottrocknung ist, dass Strahlung die teuerste Energie ist. Und deshalb sorgsam abgewägt werden muss, wann sie Vorteile bringt.

Die Infrarotstrahlung gehört zum elektromagnetischen Spektralbereich, und schließt sich an das sichtbare Licht an, bei Wellenlängen zwischen 0,78 μm und 1.000 μm , wo der Bereich der Mikrowellen beginnt. Nach ISO 20473 wird Infrarot in drei Bereiche geteilt:

- NIR Nahes Infrarot: zwischen 0,78 und 3 μm Wellenlänge,
- MIR Mittleres Infrarot: zwischen 3 und 50 μm Wellenlänge, und
- FIR Fernes Infrarot zwischen 50 und 1.000 μm Wellenlänge.

In der Papierindustrie setzen wir verschiedene Typen von Infrarotstrahlern ein. Am gebräuchlichsten, weil scheinbar günstig im Betrieb, sind gasbetriebene Strahler. Je nach Brenner haben sie ihr Leistungsmaximum bei Wellenlängen zwischen 2,5 und 3,5 μm , also im Übergang von NIR zum MIR. Dies entspricht einer Schwarzkörpertemperatur von 830 bis 1.160 K. Konventionelle elektrisch betriebene Strahler verwenden Lampen, die ihr Leistungsmaximum im Nahinfraroten bei einer Wellenlänge von rund 1,18 μm haben sowie eine Schwarzkörpertemperatur von 2.450 K aufweisen.

Optimierte elektrische Strahler haben ihr Leistungsmaximum bei 1,5 μm Wellenlänge, entsprechend einer Schwarzkörpertemperatur von 2.000 K.

Die Strahlungsintensität hängt in der vierten Potenz von der Oberflächentemperatur ab, wie aus Abb. 1, Planck'sches Strahlungsspektrum zu entnehmen ist. In den siebziger Jahren ging man davon aus, dass elektrisch betriebene Infrarotstrahler aufgrund der mehr als doppelten Schwarzkörpertemperatur eine typischerweise zwanzigfache Leistungsdichte aufweisen, und man so bei beengten Räumen sehr viel Leistung zur Trocknung aufbringen kann.

Dies war allerdings ein Trugschluss, denn die Wandlung von Energie in Strahlung ist nur der erste Schritt von mehreren, um Strich und Substrat zu trocknen. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass die ausgestrahlte Energie der Fläche unterhalb der entsprechenden Kurve in Abb. 1 entspricht. Ein Drittel der Strahlung hat kürzere Wellenlänge, zwei Drittel längere.

Abb. 2: Infrarotreflexion und Absorption von Papier und Wasser

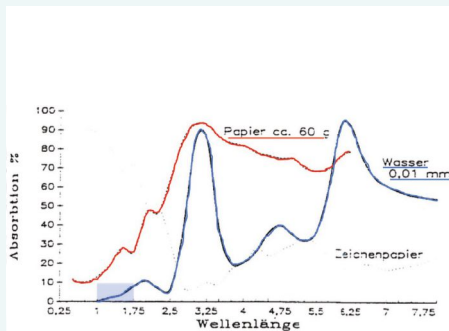


Abb. 3: Absorption von Infrarotstrahlung durch Wasser

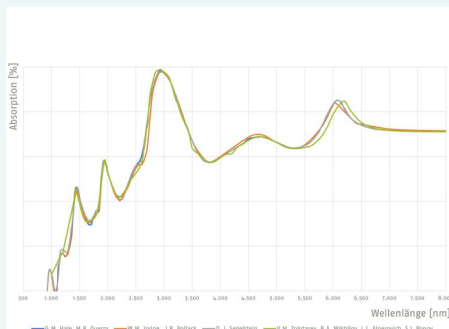


Abb. 4: Transmission von Infrarotstrahlung durch Lampenglas konventioneller Infrarotlampen (schwarz) und optimierter Infrarotlampen (rot)

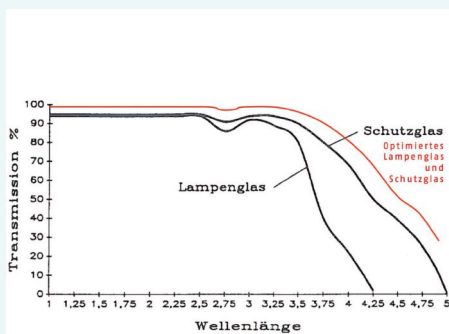
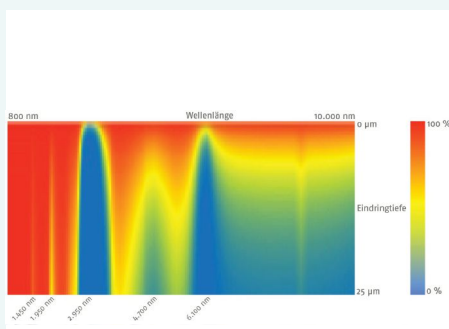


Abb. 5: Penetration und Absorption von Infrarotstrahlung durch Wasser nach Lambert-Beerschen Gesetz für Wellenlänge zwischen 800 nm und 10.000 nm und Penetrationstiefen zwischen 0 und 25 μm .



1.2.2.1 Absorption der Strahlung

Für den Papiermacher ist es wichtig, wie die Strahlung in Wärme umgewandelt wird. Dies ergibt sich aus der Absorption der Strahlung durch die Anregung der Wasserstoffbrückenbindung. Strahlung wird beim Auftreffen auf Materie entweder durchscheitern, reflektiert oder absorbiert. Die Absorption bedeutet Wandlung in Wärme. Für die Trocknung relevant ist also wie viel Energie in Strahlung gewandelt wird und wieviel dieser Strahlung durch Absorption in Wärme gewandelt wird.

Helmut Graab veröffentlichte 1991 eine hervorragende, wegweisende Studie zu den damals bekannten Infrarottrocknern.¹ Wesentlicher Bestandteil waren die Absorptionsgraphen von Wasser und Streichrohpapier in Abhängigkeit von der Wellenlänge (Abb. 2).

Der Fachartikel prägte für Jahrzehnte einen Mythos der Strichtrocknung mittels Infrarot. Die ihm vorliegende Absorptionskurve der Strahlung durch Wasser ist im Nahinfrarotbereich leider fehlerhaft. Dr. Peter Fisera et. al.² publizierten 2008, dass unterhalb einer Wellenlänge von 1,2 μm keinerlei Energie absorbiert wird. Oberhalb 2,1 μm werden hingegen 80 % der Strahlung innerhalb der ersten 20 μm absorbiert. Idealerweise sollte das Maximum der Strahlung zwischen 1,3 und 2 μm ³ liegen. Der Peak bei 1,45 μm fehlt in den Helmut Graabs damals zur Verfügung stehenden Informationen.

Präzise Vermessungen der Absorption von Infrarotstrahlung durch Wasser in festem, flüssigem und gasförmigem Zustand waren nur schwer öffentlich einsehbar, weil nur in analoger Form in sehr wenigen Bibliotheken verfügbar. Die Abbildung 3 zeigt die Absorptionskurven verschiedener Vermessungen der Interaktion^{4,5,6,7} zwischen infraroter Strahlung und Wasser in fester, flüssiger und Gasform.

Bei rund 1,45 μm und 1,95 μm wird die Infrarotstrahlung durch Wasser im Nahinfraroten sehr gut absorbiert. Erheblich weniger als bei dem Peak bei 2,95 μm und 6,1 μm . Dabei darf aber nicht vergessen werden, dass diese beiden erstgenannten Wellenlängen einer Oberflächentemperatur von 1.500 bzw. 2.000 K entsprechen - gegenüber rund 1000 K bei 2,95 μm - und so die Energiedichte das fünf- bis sechzehnfache beträgt. Auch erkennt man, dass bei Wellenlängen von 1,3 μm und kürzer kaum mehr Infrarotstrahlung absorbiert wird. Das fehlende Wissen um den Absorptionsspeak bei 1,45 μm verleitete zu der Annahme, dass grundsätzlich elektrische Infrarotstrahler trotz ihrer hohen Energiedichte für das Trocknen von Strich und Papier ungeeignet sind.

Das Glas konventioneller elektrischer Infrarotlampen absorbiert bis zu 6 % der Infrarotstrahlung, das Schutzglas weitere 5 %, wie aus Abbildung 4 ersichtlich (der rote Graph stammt nicht aus der Originalgrafik). So steht bei elektrischen Strahlern erheblich weniger Energie zur Verfügung - bis zu 10 % der Energie wird durch das Glas absorbiert - und gleichzeitig wird erheblich mehr Energie benötigt, um es zu kühlen. Auch wird Strahlung oberhalb 4 μm durch das Glas konventioneller Lampen weitestgehend absorbiert und trägt nicht zur Erwärmung des Trockengutes bei, erfordert aber zusätzliche Energie zum Kühlen des Glases. Im Grunde muss bei konventionellen, elektrischen Lampen gegen-

über Gasstrahlern mit Verlusten von über 15 % gerechnet werden, die nicht im Trockengut ankommen, sondern im Lampenglas vernichtet werden. Bei optimierten Infrarotlampen sind es im Vergleich unter 8 %, die nicht vom Trockengut aufgenommen werden. Vor allem im Bereich der Absorptionsspeaks bei 2,95 μm sowie 4,7 μm wird noch ausreichend Strahlung durch das Glas durchgelassen. Somit kommt mehr Energie im Trockengut an und gleichzeitig wird die Energie zur Kühlung der Lampen verringert. Dies führt als Nebeneffekt zu erheblich verbesserter Arbeitssicherheit, da die Lampen nach dem Ausschalten in weniger als 2 s berührungskalt sind.

1.2.2.2 Penetration der Strahlung

Relevant für eine energieeffiziente Trocknung ist aber nicht nur, wie viel Ursprungsenergie von dem Trockengut absorbiert wird, sondern wo.

Wird nur die Oberfläche des Trockengutes erwärmt, müssen die tiefer liegenden Regionen mittels Wärmeleitung erwärmt werden. Und dies muss schneller geschehen als die Erwärmung der Oberfläche, um Filmbildung an der Oberfläche des Strichs oder Verhornung der Blattoberfläche zu vermeiden.

Strahlung weist jedoch eine hohe Energiedichte auf und bringt diese sehr schnell in das Trockengut ein. Die Geschwindigkeit der Wärmeleitung innerhalb des Substrats ist mit 0,3 mm/s⁹ bzw. 0,58 W/m²°C wesentlich langsamer.

Die Penetration der Strahlung wird mithilfe des Lambert-Beerschen Gesetzes beschrieben. Für wässrige Medien kann die Penetration und Absorption aus Abbildung 5 entnommen werden. Man erkennt, dass im Nahinfraroten die Strahlung tief eindringt und so gut wie nicht absorbiert wird. Man erkennt die Peaks bei 1,45 μm sowie 1,95 μm , bei denen in den oberen Schichten des Strichs die Strahlung geringfügig in Wärme gewandelt wird. Allerdings gehen über 90 % der Strahlung in das Substrat und wärmen bevorzugt dieses. Oberhalb von rund 2,5 μm bis hin zu 3,5 μm Wellenlänge absorbieren die Hydroxylgruppen die Strahlung innerhalb der ersten μm und erwärmen nur die Oberfläche des Strichs oder des Substrats. Ähnlich sieht es bei dem Peak bei 6,1 μm aus. Für die relevanten Absorptionsspeaks sind die Penetrationstiefe mit der zugehörigen Absorption in Abbildung 6 präzise ermittelt.

Dies bedeutet, dass die Strahlung gasbetriebener Infrarotstrahler die Oberfläche sehr schnell verfilmt, weil die Wärmeleitung innerhalb des Striches sehr viel langsamer die Energie in die Tiefe bringt als neue Energie in die Oberfläche eingetragen wird.

Gasbetriebene Infrarotstrahler haben ihr Leistungsmaximum je nach Brennertyp bei einer Wellenlänge zwischen 2,5 μm und 3,5 μm . Der Großteil der Strahlung wird innerhalb der ersten 5 μm in Wärme umgewandelt. Die Wärmeleitung innerhalb des Strichs erfolgt sehr viel langsamer, so dass die initiale Sedimentschicht lang kühl bleibt, während die Oberfläche die heißeste Schicht des Strichs ist. Die Trocknung beginnt an der Oberfläche und drückt die flüssige Phase des Strichs in das Substrat. Und mit ihr den Binder und die Feinstoffe des Strichs. Bei Barrierestrichen wird das Barrierepolymer in das Substrat getrieben, wo es keine Barriere bildet, sondern nur hohe Kosten verursacht.

Abb. 6: Penetration und Absorption von ausgewählten Wellenlängen der Infrarotstrahlung durch Wasser nach Lambert-Beerschem Gesetz für Wellenlänge zwischen 780 nm und 6.100 nm und Penetrationstiefen zwischen 0 und 1.000 μm ¹¹

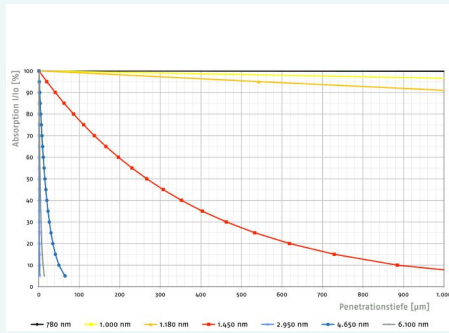


Abb. 7: Entwicklung der Temperatur der Oberfläche und der initialen Sedimentschicht bei Trocknung mit Infrarotstrahlung bei 60°C ohne Entwässerung der initialen Sedimentschicht

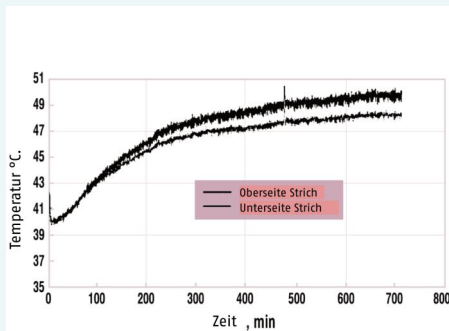


Abb. 8: Dämpfung der Energie der Infrarotstrahlung als Funktion der Dicke des Blatts für verschiedene Temperaturen von Schwarzstrahlern

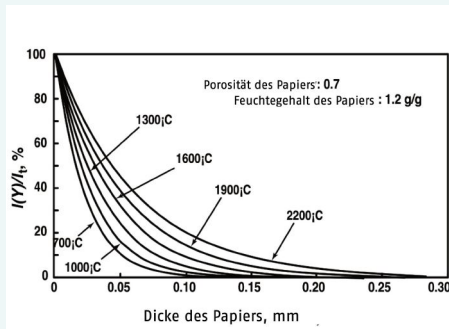


Abb. 9: Veränderung der Verdampfungsrates als Funktion der ursprünglichen Papierfeuchte bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten bei einer Schwarzstrahlertemperatur von 100°C¹⁵

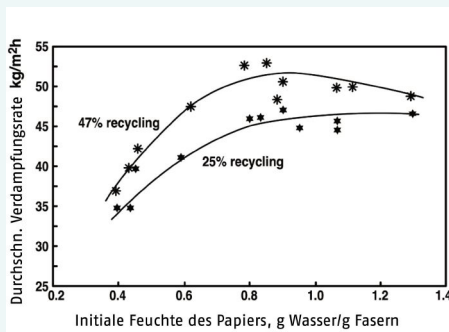
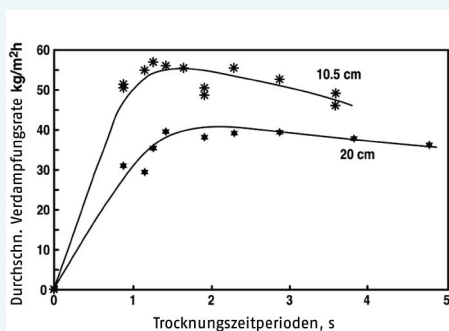


Abb. 10: Veränderung der durchschnittlichen Verdampfungsrates als Funktion des Abstandes des Strahlers von der Papieroberfläche bei einer Schwarzstrahlertemperatur von 1.100°C¹⁶



1.2.2.3 Temperaturdifferential

Bei ihren Untersuchungen zur Migration von Binder vermaßen Philippe Bernada und Denis Bruneau die Verzögerung der Erwärmung der Sedimentschicht gegenüber der Oberfläche des Strichs (Abb. 7). Sie vermaßen die Temperatur¹² des Strichs an der Oberfläche und in der Sedimentschicht, beaufschlagten die Sedimentschicht mit einem Vakuum. Die Strichdicke betrug 1 cm, also 10.000 μm , um eine ausreichende zeitliche Auflösung zu bekommen. Gleichzeitig mussten sie die elektrischen Strahler so weit herunterdrehen, dass sie eine Temperatur von 50°C bis 160°C einstellen konnten, also einem Strahlungsmaximum bei 7 μm bis 8 μm . Dadurch wurden über 90% der eingebrachten Energie in den obersten 10 μm absorbiert.

Dies führte zu einer extremen Migration der flüssigen Phase ins Substrat. Und erst 30 min bis 120 min später erreichte die initiale Sedimentschicht die gleiche Temperatur wie die Oberfläche des Strichs. Problematisch ist trotz des geringen Energieeintrags, dass sich die Oberfläche durch Radiation stärker erwärmte als die Energie durch Konduktion in tiefere Schichten weitergeleitet werden konnte. Für ihr ursprüngliches Ziel - Untersuchung der Bindermigration - war dieser Versuch im Grunde nicht hilfreich, aber er stellt sehr gut dar, was bei der Strichtrocknung passiert, wenn man in die Oberfläche schneller Energie einbringt als im Trockengut durch Wärmeleitung weitergeleitet wird. Genau das Resultat einer Trocknung mit gasbetriebenen Infrarottrocknern oder Hochleistungsheißlufthauben.

Kuang, Thibault, Chen und Grandjean untersuchten 1995 die Dämpfung der Energie der Infrarotstrahlung für verschiedene Wellenlängen entsprechend vorgegebenen Schwarzkörperstrahlern in Abhängigkeit von der Papierdicke (Abb. 8)¹³. Dabei stellten sie fest, dass bei 2.200°C (entsprechend einer Wellenlänge um 1,2 μm eines elektrisch betriebenen Infrarotstrahlers) die Strahlung am wenigsten gedämpft wurde, also sehr tief eindrang, wie man es auch nach dem Gesetz von Lambert-Beer erwarten muss. Erst bei 300 μm Tiefe war die Strahlung absorbiert.

Wobei es hier eine Abweichung zu Abbildung 5 und Abbildung 6 gibt, bei denen wir Wasser als Medium annahmen. Die Fasern im Papier weisen zwar auch sehr viele Hydroxylgruppen auf, aber diese machen sich leicht anders bemerkbar (Abb. 2). Bei den Graphen entsprechend 700°C und 1.000°C, die typisch für gasbetriebene Infrarotstrahler sind, wird die Strahlung in den ersten 120 μm bereits vollständig in Wärme umgewandelt.

Helmut Graab bemerkte in seiner oben aufgeführten Arbeit, dass bei elektrischen Hochtemperaturstrahlern nach dem Strahler nicht die Temperaturen gefunden wurden, die man von gasbetriebenen Niedertemperaturstrahlern gewohnt ist. Er nahm an, dass seine Ergebnisse die Messungen von Björnberg¹⁴ widerlegen. Dieser hatte jedoch festgestellt, dass bei kürzerer Wellenlänge die Strahlung tiefer in das Papier eindringt und aus diesem Grunde die Temperatur der Bahnoberfläche keinen Hinweis auf die absorbierte Energie bei Hochtemperaturstrahlern erlaubt. Was der Theorie des Gesetzes von Lambert-Beer entspricht.

Wie von Björnberg postuliert, ist diese Oberflächentemperatur irrelevant - wenn man mit Hochtemperaturstrahlern richtig

trocknet. Bei gasbetriebenen Niedertemperaturstrahlern hingegen ist die Messung der Temperatur unerlässlich, weil hier von außen nach innen getrocknet wird, und über die Temperatur nach jedem Trockner eingestellt werden kann, wieviel Binder in das Substrat getrieben wird.

Bei den Hochtemperaturstrahlern muss man diejenigen NIR-Strahler mit Leistungsmaximum bei 1,18 μm von den optimierten eNIR-Strahlern mit 1,45 μm unterscheiden. Letztere weisen nur 50 % der Verlustleistung von NIR-Strahlern auf, bei denen knapp die Hälfte der Strahlung bei Wellenlängen kürzer 1,3 μm ausgestrahlt wird, die nicht mit den Wasserstoffbrückenbindungen und Hydroxylgruppen interagiert – also nicht in Wärme gewandelt wird.

1.2.2.4 Massentransport des Wassers

Verdampfen gehört zum ersten Teil der Trocknung. Der wichtige zweite Schritt ist der Massentransport des verdampften Wassers aus dem Trockengut, sei es Strich oder Papier. Und noch wichtiger ist die Richtung, in der dieser Massentransport erfolgt. Dies definiert, wie viel Energie in Summe aufgewendet werden muss.

Idealerweise verdampfen wir das Wasser an der Strich- oder Bahnoberfläche. Haben wir es geschafft, mit der Strahlung tief in das Substrat einzudringen, bequemt sich das Wasser an die Oberfläche. Sobald dort das Wasser verdampft, entzieht es der Oberfläche die Verdampfungsenthalpie und kühlt diese. Obwohl direkt unter dem Strahler, wird die Oberfläche für das Wasser zur Wellness-oase. Allerdings nur so lange bis die laminare Grenzschicht dampfgesättigt ist, und die partiellen Dampfdrücke in der Oberfläche und der Laminarschicht gleich groß sind. Dann stoppt die Verdampfung und das Wasser verbleibt im Trockengut.

Durch turbulente Störung der laminaren Deckschicht mit warmer, trockener Luft wird der partielle Dampfdruck oberhalb der Bahn erheblich verringert, so dass große Mengen Wasser verdampft werden können. Abbildung 9 zeigt die Untersuchungen von Kuang, Thibault, Chen und Grandjean, wie sich die Verdampfungsrates durch höhere Geschwindigkeiten der Kühlluft verbessert – je schneller die Laminarschicht turbulent gestört wird, desto mehr Wasser wird verdampft. Und desto kühler wird die Oberfläche.

Zusätzlich stellten sie fest, dass sich die Verdampfungsrates steigert, je dichter der Strahler über der Oberfläche sitzt (Abbildung 10). Bei geringerem Abstand ergeben sich höhere Scherkräfte, die zur Steigerung der Turbulenz führen. Und Turbulenzen sind der natürliche Feind von laminaren Grenzschichten. Auch diese Verringerung des Abstandes zeigt, dass für eine gute Trocknung die Störung der dampfgesättigten Grenzschicht wesentlich ist, da diese zu einer substanziellen Kühlung der Oberfläche führt – nicht aufgrund erhöhter Luftgeschwindigkeit, sondern aufgrund erhöhter Verdampfungsrates.

1.2.2.5 Richtung des Massentransports

Wird die Infrarottrocknung so durchgeführt, dass man bereits beim Einbringen der Strahlung mit dem Verdampfen des Wassers beginnt, wird die Oberfläche durch die Verdampfung-

enthalpie kühl gehalten. Wird gleichzeitig die Wellenlänge der Strahlung so ausgewählt, dass der größte Teil der absorbierten Energie tief im Substrat in Wärme umgewandelt wird, erhält man einen Temperaturgradienten zwischen der initialen Sedimentschicht und der Oberfläche des Strichs. Das Wasser bewegt sich immer dorthin, wo es kühler ist, und verlässt den Strich an der Oberfläche. Diese trocknet zuletzt, wenn das Substrat und der Strich an Wasser verarmt sind. Es gibt keine vorzeitige Vernetzung oder Verfilmung an der Oberfläche.

Die flüssige Phase des Strichs, Binder und Feinstoffe penetrieren nur so weit in das Substrat wie es den kapillaren Kräften des porösen Substrats entspricht – ausreichend, um sehr gute Rupfwerte zu erhalten.

Idealerweise verwendet man hierzu Strahler, die ein Strahlungsmaximum zwischen 1,5 und 2,0 μm Wellenlänge aufweisen. Hier verliert man erheblich weniger Energie in einem Wellenlängenbereich, der weder Wasserstoffbrückenbindung noch Hydroxylgruppen anregt. Und ist gleichzeitig noch in einem Bereich, in dem die Strahlung ausreichend tief in das Substrat eindringt.

Die richtige Infrarotstrahlung verhindert durch Erwärmung des Substrats, dass die flüssige Phase des Strichs abgebremst, diese dann von den Fasern des Substrats gelöst, und wieder Richtung Oberfläche beschleunigt werden muss. Man muss also lediglich die Energie zur Verdampfung einbringen.

2 Praxisbeispiele

Diese theoretischen Vorteile der eNIR-Trockner zur Strichtrocknung, Profilierung, Substrattrocknung und Vorwärmung lassen sich auch in der Praxis erkennen. Mehrere Beispiele zeigen, dass die Theorie der Trocknungsphysik die Praxis der Trocknung präzise beschreiben.

2.1 eNIR-Booster für Vorstrichtrocknung

Eine Kartonmaschine ist mit einer Online-Streichmaschine ausgerüstet, mit jeweils zwei Streichköpfen für Vorstrich Ober- und Rückseite sowie den dazugehörigen Deckstrichen. Die Trocknung der Vorstriche bestand aus zwei Reihen NIR-Strahlern mit Leistungsmaximum bei einer Wellenlänge von 1,18 μm , gefolgt von zwei Heißlufthauben. Im Grunde jahrelang das optimale Konzept mit Fixierung der initialen Sedimentschicht, gefolgt von sehr günstiger Trocknung für die Hauptlast der Verdampfung. Die Infrarottrocknung bestand aus 2 Reihen à 28 Modulen à 30 kW elektrischer Leistung. Der typische Vorstrich wurde mit einem Auftragstrockengehalt zwischen 69 % und 71 % gefahren, das typische Auftragsgewicht betrug 13 g/m². Ursprünglich ausgelegt für eine Produktionsgeschwindigkeit von 400 m/min, wurde nun bei 700 m/min produziert.

Die Kartonfabrik wünschte sich weitere Freiheiten:

1. Steigerung des Vorstrichgewichts auf 20 g/m², oder
2. Steigerung der Produktionsgeschwindigkeit auf 1.000 m/min, wobei letzteres erst zusammen mit einem Umbau der Deckstrichtrocknung ausgereizt werden sollte.

Es gab verschiedene Vorschläge zum Umbau der Maschine mit

Abb. 11: Veränderung der Feuchte des Rohkartons und des Kartons nach der Vorstrichtrocknung mit NIR-Strahlern und eNIR-Strahlern¹⁷

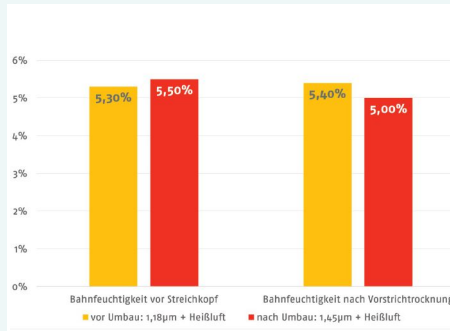


Abb. 12: Veränderung der spezifischen Verdampfungsrates als Funktion der Kapillarität des Substrats in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Strahlers¹⁸



Abb. 13: Veränderung des Wassergehaltes als Funktion der Wellenlänge des Strahlers¹⁹

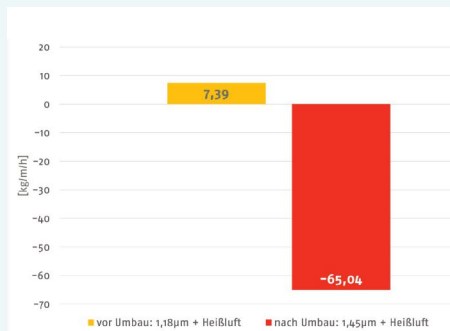


Abb. 14: Normierte Produktionsgeschwindigkeit und synthetischer Qualitätsindex eines Barrierestrichs mit Heißlufthaube sowie Booster plus Heißlufthaube zur Strichrocknung²⁰

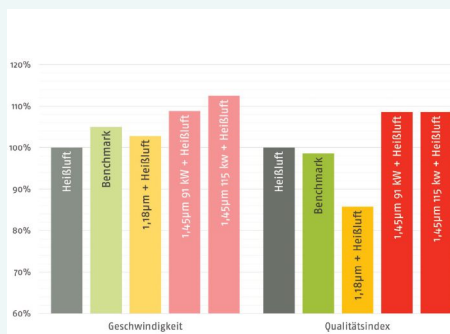


Abb. 15: Temperaturkurve und Feuchte eines Barrierestrichs mit Heißlufthaube sowie Booster plus Heißlufthaube zur Strichrocknung²¹



Kosten zwischen 18 und 25 Millionen USD. Einer sah den Einsatz von gasbetriebenen Infrarotstrahlern vor, ein anderer eine Ergänzung der Heißlufthauben. Beide bedingten die Verlagerung der Aufrollung, der beiden Deckstriche und des zweiten Vorstrichs.

Ein dritter sah die ausschließliche Verwendung von Heißlufthauben vor, hier hätte vermutlich die Werkshalle verlängert werden müssen.

Der Kunde entschied sich zu einem Austausch der Strahler für knapp 1 Mio. USD. Es wurden eNIR-Strahler eingesetzt, deren Strahlungsmaximum bei einer Wellenlänge von 1,4 µm liegt. Die Austauschstrahler hatten mit 24 kW 20 % weniger Leistung wie die Originalstrahler, es wurde aber eine um 80 % höhere spezifische Verdampfungsleistung garantiert, wodurch die Ziele des Kunden erreicht werden konnten. Abbildung 11 zeigt, dass bei den NIR-Strahlern der Karton nach der Vorstrichtrocknung leicht feuchter war als der Rohkarton.

Nach dem Umbau auf eNIR-Trockner gelang es bei den Referenzläufen, aus dem Karton mehr Wasser zu verdampfen als mit der Standardkonfiguration. Nach der Vorstrichtrocknung mit eNIR war der vorgestrichene Karton erheblich trockener als der Rohkarton. Dabei muss berücksichtigt werden, dass bei solch niedriger Feuchtigkeit der energetische Aufwand zum Lösen des Wassers von den Fasern des Substrats erheblich größer wird. Es zeigt aber auch, dass eine tiefe Penetration der Strahlung in das Substrat den Strichstand erheblich verbessert, dadurch das übermäßige Eindringen der flüssigen Phase in das Substrat verhindert werden kann, und so der energetische Aufwand für die Strichrocknung erheblich reduziert wird. Abbildung 12 zeigt, wie eine optimale Auswahl der Wellenlänge die Penetration der flüssigen Phase des Striches in das Substrat wirksam verhindert und so die Migration von Binder und Feinstoffen unterbindet. Man erkennt, dass eNIR auf der raueren Kartonseite mit höheren Kapillarkräften sehr viel wirksamer ist, da insgesamt das Substrat sehr viel stärker aufgewärmt wurde. Auf dieser Seite des Kartons sieht man, dass die bisherigen Infrarotstrahler deutlich überfahren waren – sie waren nur für eine Geschwindigkeit von 400 m/min ausgelegt gewesen – und bei 700 m/min nicht verhindern konnten, dass Latex, Stärke und Feinfraktion des Pigments in das Substrat migrierten. Gleichzeitig konnten die bisherigen NIR-Strahler die Oberseite des Strichs nicht kühlen, da erst unter den Heißlufthauben verdampft wurde. Das Temperaturdifferential zwischen Oberfläche des Strichs und initialer Sedimentschicht war im Grunde nicht vorhanden, auch hierdurch wurde der Massetransport an die Oberfläche nicht erreicht.

Die optimierten eNIR-Strahler konnten dies trotz 20 % geringer Leistung erheblich besser bewerkstelligen. Es wurde genügend Strahlung im Substrat in Wärme umgewandelt. So wird insgesamt sehr viel weniger Energie zum Verdampfen des Wassers benötigt.

Fragen zur Optimierung der Vorstrich- und Deckstrichformulierungen dürfen hier nicht beantwortet werden. Aber erfahrene Entwickler wissen, wie die Kosten des Vor-, vor allem aber des Deckstrichs reduziert werden können, wenn sich der Strichstand

so sehr verbessert wie in diesem Fall. Dies führt natürlich auch zu einer Dekarbonisierung bei den Rohstoffen.

Abbildung 13 zeigt dies eindeutig: mit NIR-Strahlern hatte der Karton nach der Vorstrichrocknung 7,39 kg/m/h mehr Wasser als das Substrat. Bei der Trocknung mit eNIR bei gleicher Leistung 65,04 kg/m/h weniger - die richtige Wellenlänge spart also erheblich Energie.

2.2 eNIR-Booster für Barriertrocknung

Eine Papierfabrik stellt auf einer Offline-Streichmaschine unterschiedliche Spezialpapiere her, davon eines mit einer Barriere aus hochmolekularen PVOH. Auf beiden Seiten werden mehrere Beschichtungen aufgetragen, auf der Oberseite als letztes eine Barriere, die mit fünf Heißlufthauben getrocknet wird. Sorten mit dieser Barriere werden mit recht niedriger Produktionsgeschwindigkeit gestrichen. Durch die geringe Produktionsmenge wird so der hohe Deckungsbeitrag pro Tonne konterkariert, da man nun pro Stunde weniger Tonnen produziert. Zwischen Streichkopf und Heißlufthauben wird ein eNIR-Strahler installiert, mit Reflektor auf der Rückseite zur Verringerung von Strahlungsverlusten. Hierfür reicht ein Einbauraum in md von 0,5 m um ein Vorfahren um 20 % bis 30 % zu ermöglichen.

Es wird eine Strahlerreihe mit einer Leistung von 160 kW pro Meter Breite eingebaut. Im Vorfeld waren Versuche mit NIR-Strahlern mit 200 kW pro Meter Breite gefahren worden. Diese erreichten aber nicht die Minimalforderung von 5 % Leistungssteigerung, weil die Papierqualität zu sehr absank und das Papier nicht mehr verkaufsfähig wäre. Abbildung 14 zeigt die Steigerung der Geschwindigkeit um 8,8 % bzw. 12,5 %, bei verbesserter Papierqualität.

Erreicht wurde die Produktionssteigerung durch Erwärmen des Substrats bei gleichzeitiger Verdampfung während der Bestrahlung. Abbildung 15 zeigt, dass trotz sehr hohem Energieeintrag durch die eNIR-Strahler die Oberflächentemperatur niedriger liegt als mit reiner Trocknung durch Heißlufthauben. Die Verdampfungsenthalpie garantierte niedrige Oberflächentemperatur und durch positives Temperaturdifferential Bewegung des Wassers an die Oberfläche. Die Barriere wird mit einem einzigen Strich erreicht, da kein Wasser nachverdampft und so zu Nadellöchern führt. Die niedrigere Temperaturkurve und geringere Feuchte erlauben weitere Geschwindigkeitssteigerung, die mit NIR- oder gasbetriebenen Trocknern nicht möglich ist.

2.3 eNIR-Profilierung

Die Profilierung mit eNIR-Trocknern ermöglicht eine erhebliche Leistungssteigerung der Papiermaschine. Gegenüber Profilkorrektur mit Wasser ist die Strahlung erheblich teurer. Allerdings muss die Papiermaschine das aufgebrachte Wasser verdampfen. Dies erfordert zwischen 0,5 % und 3 % der Trocknungsleistung, so dass die Produktion um 2 % bis 10 % verringert wird. Wird mit Infrarot profiliert, kann das Papier erheblich feuchter an den eNIR-Trockner gefahren werden, so dass sich die Produktion typischerweise um 3 % bis 15 % gegenüber dem Profilieren mit Wasser erhöht. Die zusätzliche Produktion kompensiert dabei die höheren Kosten der Energie.

Abb. 16: Platzsparender Einbau eines eNIR-Strahlers mit an Trockenzylinder angepassten gebogenen Infrarotlampen zum optimalen Energieeintrag in die Bahn. Man erkennt feuchtere Stellen, dort leuchten die Lampen mit höherer Leistung

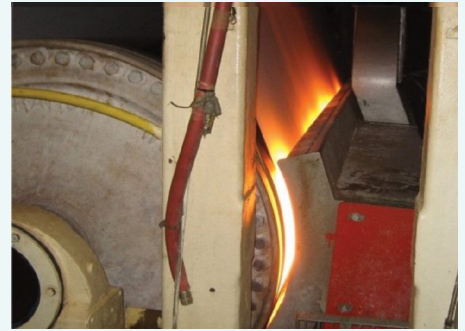


Abb. 17: Thermographie eines Betriebsversuch zur Profilierung bei 0 % Leistung



Abb. 18: Thermographie eines Betriebsversuch zur Profilierung bei 100 % Leistung. Die Maschine fuhr nur um 3,5 % nach vorne, nicht die erwarteten 10 % bis 14 %. Der führerseitige Rand ist knapp 9°C wärmer²²



Abb. 19: Thermographie eines Strahlers auf der Oberseite der Bahn zwischen Presse und Trockenpartie zur Vorwärmung der Pappe²⁴

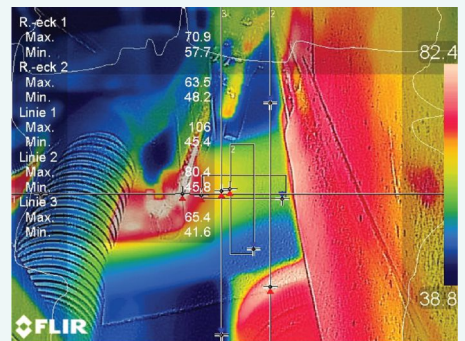
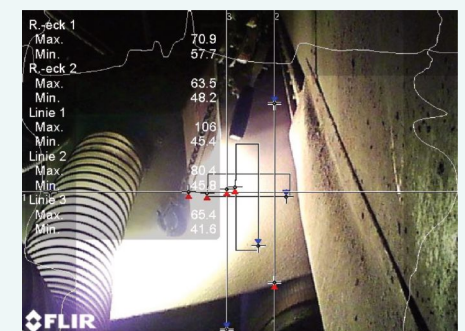


Abb. 20: Sichtbares Bild eines Strahlers auf der Oberseite der Bahn zwischen Presse und Trockenpartie zur Vorwärmung der Pappe



Die Thermographien von Abb. 17 und Abb. 18 zeigen den Einfluss auf Feuchteprofil und Temperatur der Bahn. Ohne Profilierung (Abb. 17) variiert die Temperatur kaum, gleichbedeutend mit einem akzeptablen Feuchteprofil dank der eingebauten Profilregelung mit Wasservernebelung. Beim Einschalten der Versuchsanlage (Abb. 18) fuhr die Papiermaschine um 3,5 % nach vorne, gleichzeitig erwärmte sich der bestrahlte Streifen und war an der Aufrollung noch rund 9°C wärmer. Der Rand war 2,4 %-Punkte trockener, mit rund 5% Feuchte statt 7,5 % im Rest der Bahn.

Bei Profilierung über die gesamte Breite kann die Produktionsgeschwindigkeit um rund 10 % bis 14 % vorgefahren werden. Das Feuchteprofil kann mit knapp 320 kW/m von +/-2,1 % auf +/-0,2 % gebracht werden. Obwohl die Feuchte sehr niedrig ist, und so mehr Energie benötigt wird um auch Wasser aus den Fasern zu verdampfen, lag die spezifische Verdampfungsrate bei diesem altpapierbasierten Papier bei 0,48 kg/kW.

Mit einem Energieeinsatz von 155 kW/m kann die Produktion um 12 % gesteigert werden. Bei 0,10 €/kWh entstehen in diesem Fall Kosten von 0,94 €/t. Der zusätzliche Deckungsbeitrag pro zusätzlich produzierter Tonne ist erheblich höher, so dass sich der Einsatz von Strom statt Wasser sehr schnell bezahlt macht. Typischerweise amortisieren sich solche Projekte dank der effizienten eNIR-Strahlern innerhalb von 3 bis 18 Monaten.

2.4 eNIR-Vorwärmung

Die Eigenschaften von eNIR-Strahlern lassen sich sehr gut anhand der Thermographien anlässlich eines Versuchs der Vorwärmung schwerer Pappen betrachten. Für einen Versuch wurde die Oberseite einer Pappe mit 600 g/m² und 1.000 µm Dicke mit 160 kW/m eNIR-Strahlung vorgewärmt, Abbildungen 19 und 20 zeigen den Aufbau und die Temperaturänderung auf der Oberseite der Bahn, Abbildung 21 zeigt die Unterseite. Man erkennt, wie die Temperatur verzögert auf der Gegenseite auftritt. Temperaturänderung und Geschwindigkeit der Temperaturänderung entsprechen den Erkenntnissen von Dr. Peter Fisera.²³ Man sieht, dass es selbst bei sehr niedriger Geschwindigkeit von 25 m/min rund 1,2 s dauert, bis die Wärme die Unterseite erreicht.

Die Einbringung der Energie und die Durchwärmung des Substrats in z-Richtung sind sehr gut erkennbar. Man kann sehr gut erkennen, dass die Bahn in der gesamten Tiefe erwärmt ist. Bei Vorwärmung schwererer Grammatoren mit eNIR-Strahlern wird die Bahn von Ober- und Unterseite bestrahlt, um eine perfekte Planlage zu erreichen. Dadurch wird die Temperatur in z-Richtung sehr gleichmäßig verteilt. Und während an der Oberfläche die Bahn durch Verdampfung gekühlt wird, bleibt die Temperatur in Bahnmitte hoch. Dadurch bewegt sich das Wasser Richtung Zylinderoberfläche, die Oberfläche bleibt feucht und somit ein sehr guter Temperaturleiter. Dies erhöht die Verdampfungsrate der Zylinder. Die Kosten der teuren Energie Infrarotstrahlung werden wettgemacht durch die erheblich gesteigerte Verdampfungsrate der Trockenzylinder. Diese Zylinder dienen ab der Position der Strahler der Trocknung und müssen nicht die Bahn auf Verdampfungstemperatur bringen. In Abbildung 22 erkennt man sehr schön, dass nach dem Strahler die bestrahlte Unter-

Vielfalt aus einer Hand

Premium
Papierdüsen
made in
Black Forest



Jetzt neuen
Papierdüsen-Katalog
gratis anfordern:
info@oskar-moser.de

OSKAR MOSER
TECHNISCHE EDELSTEINE



Abb. 21: Thermographie der nichtbestrahlten Unterseite der Bahn zwischen Presse und dem ersten Trockenzyklinder zur Vorwärmung der Pappe. Man erkennt, dass die Durchwärmung der Pappe zeitlich verzögert die Unterseite erreicht. Die Rückseite wird um knapp 3°C erwärmt.²⁵

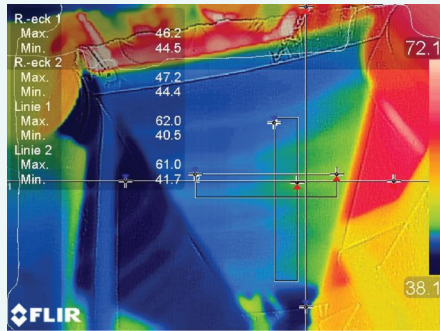
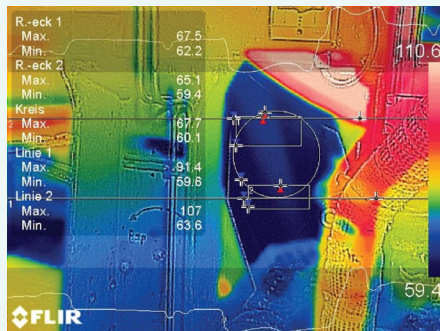


Abb. 22: Thermographie von der nichtbestrahlten Unterseite der Bahn zwischen 2. und 3. Zylinder. Man sieht auch noch nach mehreren Zylindern, dass die Rückseite im bestrahlten Bereich bis zu 8°C wärmer ist als die nicht bestrahlte Bahn.



seite rund 3°C wärmer ist als die normale Bahn, vor dem dritten Zylinder die Temperaturdifferenz bereits 8°C beträgt. An der vorgewärmten Stelle ist die Effizienz der Zylinder erheblich gesteigert.

Zusammenfassung

Bei der Strichtrocknung ist der erste und wichtigste Schritt die Erhöhung des Auftragstrockengehalts und die Verringerung der Differenz zwischen Auftrags- und Immobilisierungstrockengehalt. Letzteres verringert erheblich den Aufwand an Infrarotstrahlung, ersteres die Gesamtenergie zum Trocknen. Grundlegende Arbeiten wurden hier von Dr. Manfred Baumeister geleistet. Über Infrarotstrahlung in der Papiererzeugung gibt es einige Beschreibungen, die aber wissenschaftlicher Betrachtung nur teilweise standhalten. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse basierend auf physikalischen Gesetzen bestätigen die Eindringtiefe der gezielten Strahlung in z-Richtung.

Die optimale Strich- und Barrieretrocknung erfolgt von der initialen Sedimentschicht aus. Man erreicht dies durch Erwärmung des Substrats mit schneller Immobilisierung der initialen Sedimentschicht und Kühlung der Strichoberfläche. Es entsteht ein positives Temperaturdifferential von der Sedimentschicht zur Oberfläche mit schnellem Wassertransport nach oben. Migration in das Substrat wird auf ein absolutes Minimum verringert. Entsprechend geschieht die Trocknung von innen nach außen auch bei der Profilierung, Vorwärmung und Trocknung von Substraten. Die Qualität des Papiers wird maximal, der Energieeinsatz minimal, Rohstoffkosten können auf ein Minimum verringert werden.

Dies erreicht man nur mit elektrischen Infrarottrocknern. Ein eNIR-Trockner weist erheblich weniger Wandlungsverluste auf und verdampft bei gleichem Energieeinsatz typischerweise doppelt so viel Wasser wie ein NIR-Strahler.

Elektrische Infrarotstrahler können mit erneuerbaren Energien betrieben werden. Dies stellt einen weiteren Vorteil dar, da hierdurch ein wesentlicher Teil der Trocknung dekarbonisiert werden kann. Das Einsparungspotential mit eNIR-Strahlern ist erheblich.

www.wolfheilmann.eu

Literaturquellen:

- 1 Helmut Graab, Zanders AG: Einfluss der Strahlertemperatur von Infrarotstrahlern auf die Trocknungsleistung, Wochenblatt für Papierfabrikation 19/1991
- 2 Dr. Peter Fisera, Andritz AG; Tim Klemz, Compact Engineering: Infrared Dryers as a tool in the press section, Pulp and Paper Technical Association, Proceedings of PacWest Conference, Jasper, 2008
- 3 Magnus Pettersson, University of Lund: Heat Transfer and energy efficiency in infrared paper dryers, 1999
- 4 MG.M. Hale and M. R. Querry, Optical constants of water in the 200 nm to 200 µm wavelength region" Appl, Opt, 12, 555-563, (1973)
- 5 W, M, Irvine and J, B, Pollack, Infrared optical properties of water and ice spheres, Icarus, 8, 324--360, (1968)
- 6 D, J, Segelstein, "The complex refractive index of water," University of Missouri-Kansas City, (1981)
- 7 V, M, Zolotarev, B, A, Mikhailov, L, L, Alperovich, and S, I, Popov, Dispersion and absorption of liquid water in the infrared and radio regions of the spectrum, Optics and Spectroscopy, 27, 430--432, (1969)
- 8 Helmut Graab, Zanders AG: Einfluss der Strahlertemperatur von Infrarotstrahlern auf die Trocknungsleistung, Wochenblatt für Papierfabrikation 19/1991
- 9 Dr. Peter Fisera, Andritz AG; Tim Klemz, Compact Engineering: Infrared Dryers as a tool in the press section, Pulp and Paper Technical Association, Proceedings of PacWest Conference, Jasper, 2008
- 10 Wolf Heilmann: Physik und Anwendung elektrischer IR-Strahler, Fachausschuss COAT des Vereins Zellchemie
- 11 Wolf Heilmann: Trocknung von Barrierestrichen, Wochenblatt für Papierfabrikation 9/2019
- 12 Philippe Bernada, Denis Bruneau: Modeling binder migration during drying of paper coating, TAPPI Journal, Vol. 79; No. 9, September 1996
- 13 Kuang, Thibault, Chen, Grandjean: Pilot scale investigation of infrared drying of paper, TAPPI Journal, Vol. 78; No. 7, July 1995
- 14 T. Björnberg: Electric infrared drying – new drying method and practical experiences, TAPPI Coating Conference Proceedings 1987
- 15 Kuang, Thibault, Chen, Grandjean: Pilot scale investigation of infrared drying of paper, TAPPI Journal, Vol. 78; No. 7, July 1995
- 16 Kuang, Thibault, Chen, Grandjean: Pilot scale investigation of infrared drying of paper, TAPPI Journal, Vol. 78; No. 7, July 1995
- 17 Zheng Lin, Ningbo Zhonghua Paper; Wolf Heilmann; Tim Klemz, Compact Engineering: Optimised Coat Drying in a board machine, Wochenblatt für Papierfabrikation, 7/2014
- 18 Zheng Lin, Ningbo Zhonghua Paper; Wolf Heilmann; Tim Klemz, Compact Engineering: am angegebenen Ort
- 19 Zheng Lin, Ningbo Zhonghua Paper; Wolf Heilmann; Tim Klemz, Compact Engineering: am angegebenen Ort
- 20 Wolf Heilmann: Trocknung von Barrierestrichen, Wochenblatt für Papierfabrikation 9/2019
- 21 Wolf Heilmann: Trocknung von Barrierestrichen, Wochenblatt für Papierfabrikation 9/2019
- 22 Wolf Heilmann: Kosteneffiziente Trocknung mit teurer Energie, Herbsttagung der Regionalgruppe Süd des VPM und Zellchemie, 11/2022
- 23 Dr. Peter Fisera, Andritz AG; Tim Klemz, Compact Engineering: Infrared Dryers as a tool in the press section, Pulp and Paper Technical Association, Proceedings of PacWest Conference, Jasper, 2008
- 24 Wolf Heilmann: Kosteneffiziente Trocknung mit teurer Energie, Herbsttagung der Regionalgruppe Süd des VPM und Zellchemie, 11/2022
- 25 Wolf Heilmann: Kosteneffiziente Trocknung mit teurer Energie, Herbsttagung der Regionalgruppe Süd des VPM und Zellchemie, 11/2022