

Flexibles Strommanagement durch Infrarottiefentrocknung

Bivalenter Betrieb der Papiertrocknung zur Vorbereitung der rein elektrischen Trocknung



Abb. 1: Infrarottiefentrocknung mit eNIR Corona als Randtrockner

Die Papiererzeugung ist energieintensiv. In der Papierfabrikation entfallen rund zwei Drittel der gesamten Energie auf den Trocknungsprozess von Papier und Strich. Die Trocknung des Papiers erfolgt dabei gegenwärtig in der überwiegenden Zahl der Fälle unter Verwendung fossiler Brennstoffe.

Autor: Wolf Heilmann, Wolf Heilmann GmbH, wolfheilmann@wolfheilmann.eu

Eine Verringerung der benötigten Trocknungsenergie verringert die gesamten Energiekosten erheblich. Heutzutage könnten mit bereits vorhandenen Technologien 15 % bis 25 % der fossilen Energie ersetzt werden. Idealerweise erreicht man einen bivalenten Betrieb, bei dem je nach aktuellem Kosten der verschiedenen Energien die kostengünstigste ausgewählt wird. Auch hierfür gibt es bereits eine Lösung, die heute verfügbar ist. Es existieren diverse Werkzeuge, die dem Papiermacher gegenwärtig bereits zur Verfügung stehen, um den Trockenbedarf signifikant zu verringern und so die Defossilisierung der Trocknung zu ermöglichen.

Infrarottiefentrocknung

Ein wesentlicher Aspekt der Papierherstellung ist die Infrarottiefentrocknung. In diesem Prozess wird die Energie mit Lichtgeschwindigkeit in die tiefen Schichten des Substrats eingebracht. Das Erreichen dieses Ziels kann durch den Einsatz von NIR (Near Infra Red) Strahlern sowie von eNIR (Enhanced Near Infra Red) Strahlern realisiert werden. Dabei verdampfen letztere typischerweise doppelt so viel Wasser wie erstere.¹

Die wesentlichen Vorteile sind vielfältig:

1. Strich wird von der initialen Sedimentschicht aus getrocknet. Dadurch penetriert sehr viel weniger flüssige Phase in das Substrat. Diese müsste sonst später wieder von den Fasern gelöst werden, und an die Oberfläche beschleunigt werden – zwei energieintensive Vorgänge, die man sich sparen kann. Gleichzeitig erreicht man einen hervorragenden Strichstand mit sehr geringen Verlusten an Binder und Feinstpartikeln.
2. Papier und Karton werden aus der Tiefe heraus getrocknet. Zylinder erwärmen nur die Oberfläche. Die Geschwindigkeit des

Wärmeflusses in die Tiefe ist limitiert. Deswegen benötigt man relativ viele Zylinder, bis man das Papier durchwärmst und auf konstante Temperatur gebracht hat. Dann sind Energiezufuhr und Verdampfung in der Waage.

Allerdings kann bei zu schneller Geschwindigkeit der Papiermaschine nicht verhindert werden, dass die Mitte in z-Richtung zu feucht bleibt, und es später zur Lagenspaltung kommt. Infrarot-tiefenstrahlung hingegen durchwärmst mit Lichtgeschwindigkeit das Substrat in der gesamten Tiefe und treibt das Wasser an die Oberfläche - und erleichtert so den Zylindern oder Heißlufthauben die Arbeit. Diese sind nicht darauf ausgelegt, das Wasser an die Oberfläche zu bringen. Hier ist das teure Infrarot das Werkzeug der Wahl - es wirkt als Katalysator.

3. Durch die Tiefenwirkung der Infrarotstrahlung wird weniger Energie zum Trocknen benötigt. Beim Strichtrocknen entfällt die Energie zum Lösen des Wassers von den Fasern. Beim Vorwärmen und Profilieren wird sehr viel weniger Zeit benötigt, die man normalerweise benötigt, um die Wärme in die Tiefe des Substrats zu bringen. Die Maschine kann sehr viel schneller fahren.

Enhanced NIR Trockner von Compact Engineering verdampfen aufgrund ihrer optimierten Wellenlänge typischerweise doppelt so viel Wasser wie Standard NIR Trockner.² Für dieselbe Leistung fallen nur die halben Energiekosten an. Sie weisen geringste Energieverluste durch Energieoptimierung auf. Deswegen sind eNIR-Trockner ein zwar immer noch sehr teures Werkzeug für den Papiermacher. Allerdings das Einzige, dass sich so energieeffizient zur Tiefentrocknung eignet.

Durch die Tiefentrocknung von Substrat und Strich kann der gesamte Energieverbrauch verringert werden. Dabei wird ein Teil der fossilen Energie durch potenziell erneuerbare Energie ersetzt. Bei der Strichtrocknung werden fossile Gase durch erneuerbare Energien ersetzt. In manchen Fällen werden auch die Gesamtenergiekosten gesenkt.

Anwendungsbeispiele

An verschiedenen Anwendungsbeispielen erläutern wir, wie sich die Dekarbonisierung der Trocknung bereits heute durchführen lässt, bzw. durchgeführt wurde, bei Verringerung der Energiekosten.

Anwendungsfall 1 - Filmpressentrocknung einer Spezialpapiermaschine

Es handelt sich um eine Spezialpapiermaschine, die von hochwertigen Verpackungspapieren bis hin zu Papieren mit funktionalen, teilweise hochkomplexen PVA-Beschichtungen produziert. Die Trocknung wurde bisher mit Heißluft durchgeführt. Diese wurde mit Gas erzeugt. Nachfolgend ist eine Nachtrockenpartie angefügt.

Bei einfacherem Stärkeauftrag ist dies vollkommen ausreichend. Das Gleiche gilt für einfache pigmentierte Striche mit Latex. Für bestimmte Beschichtungen ist dies jedoch suboptimal. Die Produktionsgeschwindigkeit muss deshalb je nach Beschichtung angepasst werden. Bei leichten Papieren erzielt man so nur einen unzureichenden Deckungsbeitrag.

Die Flächengewichte der fertigen Produkte reichen von 60 g/m² bis 400 g/m². Die Beschichtungen können einfache Stärkeaufträge sein, eine Stärke-Latex-Kombination, PVA, PVA mit Stärke sowie PVA mit Stärke und Pigment. Bei einem Auftragstrockengehalt zwischen 10 % und 18 % sowie einem Strichgewicht zwischen 3 g/m² und 10 g/m² kann sehr viel Wasser anfallen. (Abb. 2) Die Trocknung war aufgrund des begrenzten Einbauraums eingeschränkt. Es war auch nicht möglich, den Energieeintrag in die Oberfläche zu erhöhen, da die Wärmeweiterleitung in die tieferen Schichten des Strichs und des Substrats physikalisch begrenzt ist. Eine Steigerung des Energieeintrags hätte zur vorzeitigen Verfilmung der Oberfläche geführt.

Besonders kritisch war dies bei der Trocknung von PVA-basierten Beschichtungen - dies führt bei vernünftiger Produktionsgeschwindigkeit zu den typischen Oberflächenbeschädigungen wie Nadellöchern. Diese entstehen, wenn ein Großteil der flüssigen Phase in das Substrat migriert. Und dann in der Nachtrockenpartie ihren Weg zurück an die Oberfläche und durch den verfilmt PVA findet.

Die Heißluftthauben wurden durch eine Reihe von eNIR-Apollo-Strahlern auf der Ober- und Rückseite sowie durch einen gegenüberliegenden Reflektor ersetzt. Dies sind die kleinsten Trockner von Compact Engineering, die sich bei sehr leichtgewichtigen Substraten jedoch immer als das Mittel der Wahl erweisen. Um dem beim Bestrahlen verdampften Wasser eine ausreichende Ventilation zu ermöglichen, wurden die Strahler und Reflektoren voneinander getrennt. Statt der ursprünglich vorgesehenen 920 mm Einbauraum wurden 1 250 mm eingeplant. Die installierte Leistung beträgt 160 kW/m pro Seite. Mit maximal 230 kW/m, also knapp zwei Dritteln dieser Leistung, konnten alle Beschichtungen immobilisiert und teilweise auch das Wasser verdampft werden.

Die Besonderheit der eNIR-Trockner besteht darin, dass die initiale Sedimentschicht sofort immobilisiert wird. Dadurch wird verhindert, dass die flüssige Phase - und somit auch wertvolle Strichbestandteile - in das Substrat eindringen. Der Energiebedarf zur Trocknung verringert sich dadurch erheblich, da Wasser nicht mehr von den Fasern des Substrats gelöst und an die Oberfläche beschleunigt werden muss. Mit derselben Energie wird somit erheblich mehr Wasser verdampft.

Für die Papierfabrik führt dies zu einer sehr erfreulichen Verringerung des Dampfdruckes der Nachtrockenpartie um ein gutes Drittel. Und ermöglicht so in Zukunft den Einsatz einer sehr effizienten Wärmepumpe zur Dampfgewinnung in der Nachtrockenpartie.

Durch eine mögliche Profilierung am Ende der Vortrockenpartie wird man auch dort den benötigten Dampfdruck verringern können, und auch hier in Zukunft den Einsatz von energieeffizienten Wärmepumpen in Betracht ziehen.

Typischerweise amortisiert sich solch eine Installation innerhalb von 12 bis 24 Monaten, in bestimmten Fällen unter 6 Monaten.

Anwendungsfall 2 - Profilregelung einer Kartonmaschine

Eine Papiermaschine dient zur Herstellung von Verpackungspapieren. Bisher wurde das Profil mithilfe eines Wiederbefeu-

tungssprühbalkens eingestellt. Hierzu musste das Substrat zunächst übertrocknet und anschließend in den zu trockenen Bereichen mit Wasser rückbefeuchtet werden.

Vor der Leimpresse soll die Feuchte in md und cd möglichst konstant gehalten werden. Aber auch sehr schnell geregelt werden können, um gleichmäßiges Wegschlagen des Stärkeauftrags zu erreichen. (Abb. 3, 4)

Auf jeder Papierseite sind eNIR Titan installiert, die bei rund 75 % mehr Einbauraum 100 % mehr Trockenleistung bringen als die Apollo. Diese Strahler können im normalen Betrieb Feuchteschwankungen von +/- 0,8 % auf +/- 0,1 % verringern. Dadurch lässt sich eine Maschine typischerweise um 3 % bis 8 % nach vorne fahren.

Profilregelungen machen sich typischerweise innerhalb von 6 bis 18 Monaten bezahlt, je nachdem, wie groß die Feuchteschwankungen sind.

Durch die Zuschaltung einer Vorlast können die Trockner den Feuchtegehalt um bis zu 3 % senken. Die Produktionsgeschwindigkeit kann somit um 10 bis 12 % erhöht werden, bei gleichem Dampfverbrauch. Alternativ kann der Dampfverbrauch entsprechend gesenkt werden, bei gleicher Produktionsgeschwindigkeit.

Anwendungsfall 3 - Vorwärmung einer Kartonmaschine

Bei Karton mit hohen Grammaturen ist der Energieeintrag in die Tiefe ein zeitraubender Prozess. Der Wärmeübergang vom Zylinder zur Oberfläche erfolgt hingegen sehr schnell. Die Weiterleitung in die Tiefe erfolgt jedoch nur langsam. Dies hat zum einen zur Folge, dass die Oberfläche vorzeitig austrocknet und so zu einem Thermoisolator wird. Andererseits wird die Lagenpaltung gefördert, da die Mitte der Bahn in z-Richtung nur unzureichend trocknet. Gleichzeitig muss am Ende der Maschine die Oberfläche weiter übertrocknen, um in der Tiefe des Substrats den erforderlichen Trockengehalt zu erreichen.

Durch Installation einer Impingementtrocknung zwischen Presse und Trockenpartie wird die Bahn in ihrer gesamten Dicke mit Lichtgeschwindigkeit auf Verdampfungstemperatur gebracht.³ Mit jeweils 320 kW/m auf Ober- (eNIR Titan) und Rückseite (eNIR Corona) kann die Papierbahn auf Temperaturen zwischen 60 °C und 85 °C gebracht werden. Der erste Strahler ist zwischen Presse und Vortrockenpartie installiert, der zweite gegen den unteren Trockenzylinder.

Bei einem Energieeintrag von rund 24 kWh pro Tonne Karton wurde dieser auf 60 °C erhitzt. Und zwar in der gesamten Dicke des Substrats. Da die Oberfläche durch den Entzug der Verdampfungsenthalpie kühler ist als die Mitte, strömt nun das Wasser an die Oberfläche und erleichtert den Trockenzylindern so ihre Arbeit. Diese sind zwar hervorragend zum Verdampfen geeignet, aber nicht sehr effizient, um das Wasser innerhalb des Substrats an die Oberfläche zu bewegen.

Bei einem Energieeintrag von rund 72 kWh/t wurde der Karton auf 85 °C erwärmt. Bereits unter den eNIR-Trocknern kam es zur Verdampfung. Dies ist energetisch jedoch nicht vorteilhaft, da die elektrischen eNIR-Trockner hier die Arbeit der Zylinder übernehmen. Dies ist nur bei extrem niedrigen Stromkosten interessant.



Abb. 2 Filmpressentrocknung mit eNIR Apollo



Abb. 3: Feuchteprofil ohne Profilierung mit Befeuhtungsbalken

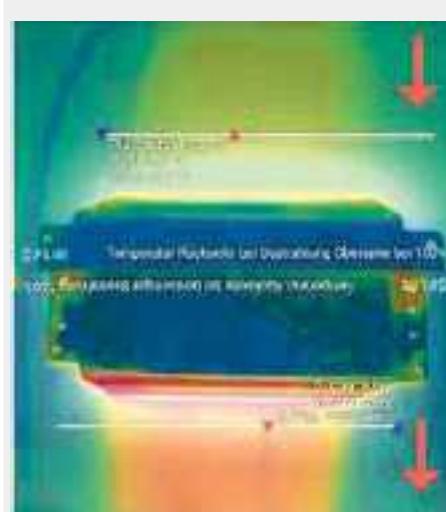


Abb. 4: Feuchteprofil mit eNIR

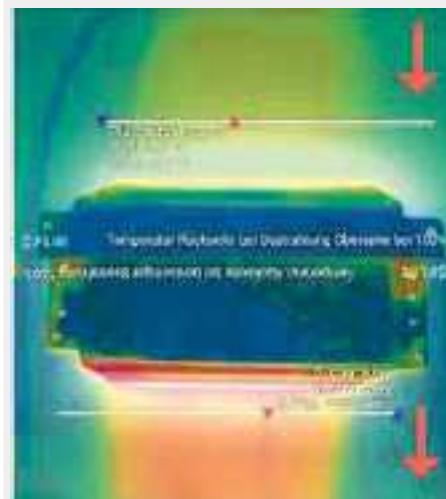


Abb. 5: Vorwärmung eines Kartons mit 72 kWh/t und Erhöhung der Temperatur auf 84°C

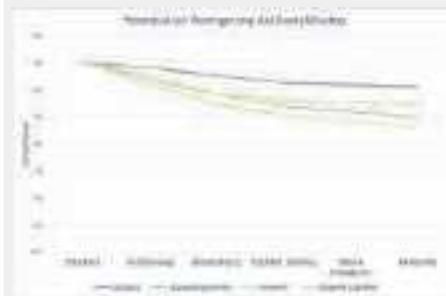


Abb. 6: Potenzial zur Verringerung des erforderlichen Dampfdruckes, im Normalbetrieb und im elektrisch optimierten Betrieb

Bei einer Leistung von rund 72 kWh/t wurde durch die Impingementtrocknung mehr als 7,5 % der gesamten Trockenleistung der Papiermaschine erreicht. Es wurden 840 g Wasser pro kWh aus dem Karton heraus verdampft. Dies liegt nahe an den theoretisch möglichen 860,4 g bei Verdampfung von reinem Wasser. Dies zeigt die Katalysatorwirkung der eNIR-Trockner: Sie erwärmen das Substrat vollständig in Z-Richtung. Das Wasser bewegt sich an die Oberfläche des Substrats, da diese der kälteste Punkt ist – somit die Wellnessoase für das Wasser im Substrat. Dies erleichtert den Zylindern die Arbeit, da ihnen das Wasser entgegenfließt.

Bei einer Mehrproduktion macht sich eine Vorwärmung innerhalb von 6 bis 18 Monaten bezahlt, ohne Mehrproduktion kann es 36 Monate dauern, bis sich das Projekt über die Dampf einsparungen bezahlt gemacht hat.

Digitaler Zwilling zur weiteren Verringerung des Dampfdruckes

Auf Basis der Trocknungsalgorithmen von CF ProcSim hat AutomationX einen digitalen Zwilling entwickelt, der den Dampfverbrauch bei gleichbleibender Produktion und Qualität um 4 bis 8 % verringert. Diese Einsparungen wurden auch von Papierfabriken bestätigt.⁴ Dabei ergeben sich Amortisationsdauern von sechs bis zwölf Monaten. Je nach Leistung der Maschine kann sich die Investition aber auch schon nach drei Monaten bezahlt machen. Es wird kein Stillstand benötigt, um diesen digitalen Zwilling zu implementieren.

Automatischer bivalenter Betrieb der Papiermaschine

Dieser digitale Zwilling wurde nun so erweitert, dass er die aktuellen Preise aller Energien berücksichtigt. Wenn eine Papierfabrik einen flexiblen Stromtarif hat, wird die Papiermaschine so geregelt, dass nicht nur Energie eingespart wird, sondern dass nachts und am Wochenende ein Teil der Trockenlast in Richtung elektrische Energie verschoben wird.

In dem oben genannten Beispiel würde die Impingementtrocknung bei hohen Stromkosten durch den bivalenten Betrieb das Substrat nur auf 60 °C bis 65 °C erwärmen. Zudem wird die Profilregelung ohne Vorlast betrieben. Verringert sich der Strompreis, wird die Vorwärmung bis zum Maximum gesteigert, im oben genannten Fall bis 85 °C. Bei der Profilregelung wird zudem eine Vorlast vorgegeben. So können 15 % bis über 30 % des Dampfs durch Strom ersetzt werden, ohne dass sich die Qualität oder die Produktion verändern.

Weitere Möglichkeiten zur Verringerung des Dampfdruckes

Weitere Bausteine zur Verringerung des Dampfdruckes können eingesetzt werden, um den Betrieb der Wärmepumpen noch effizienter zu gestalten.

Mit der Online-Filzwäsche von NCR Biochemical werden Trocken gehaltssteigerungen von 0,25 bis 1 % nach der Presse erreicht.

Dasselbe Niveau erreichen die speziellen Bentonite von Aquatan. Sie maskieren die Störstoffe, sodass deren intrinsisches Wasser rückhaltevermögen bei der Entwässerung nicht mehr zum Tragen kommt. Beides zusammen führt zu einer Verringerung des Dampfverbrauchs um 2 % bis 6 % und somit zu einem niedrigeren Dampfdruck. Und beide Maßnahmen erfordern keine Investition, sondern können bei laufendem Betrieb sofort umgesetzt werden.

Weitere Maßnahmen führen zu einer weiteren verringerten Anforderung an die Trocknung. Zuallererst eine Pressenoptimierung, wobei diese Maßnahme die größte Investition darstellen wird. (Abb. 6)

Wärmepumpen zur kompletten Defossilisierung

In diesem bivalenten Betrieb kann der Dampfdruck um ein Drittel und mehr verringert werden. Dadurch wird der Betrieb sehr effizienter Wärmepumpen von BM GreenCooling mit hohem COP dank reduzierten thermischen Hubs ermöglicht.⁵ Die Amortisationsdauer hängt von dem erreichbaren COP ab, sowie den aktuellen Preisen für erneuerbare und fossile Energien ab. Die eNIR-Trockner kommen nur dort zum Einsatz, wo sie der Wärmepumpe technologisch überlegen und energetisch ebenbürtig sind, also beim kompletten Durchwärmten des Substrats in Z-Richtung.

Zusammenfassung

Die Defossilisierung der Papiertrocknung ist heute mit bereits vorhandenen Lösungen möglich. Idealerweise erfolgt dies im bivalenten Betrieb, bei dem automatisch der betriebswirtschaftlich ideale Betriebszustand anhand der aktuellen Energiekosten ausgewählt wird. Angesichts steigender Kosten für CO₂-Zertifikate wird dies ab 2027 zu einer immer stärkeren Gewichtung des elektrischen Betriebs führen. Dadurch wird der CO₂-Ausstoß von Papierfabriken erheblich reduziert.

In der Ausgabe 8/2025 vom „Wochenblatt Papierfabrikation“ erfahren Sie, wie AutomationX den bivalenten Betrieb ermöglicht und vor allem, wie Sie bei der Trocknung bis zu 8 % Dampf einsparen können. Dem Beitrag folgt ein Artikel über den Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen von BM GreenCooling. Diese sind sehr energieeffizient und ermöglichen bereits heute mit einem COP über 3 die kosteneffiziente Defossilisierung der Dampferzeugung.

Quellen:

1 W. Heilmann, Kosteneffiziente Trocknung mit teurer Energie, Regionaltagung Süd des VPM & Zellcheming, 11/2022

2 W. Heilmann, Physik und Anwendung elektrischer Infrarotstrahler, Wochenblatt für Papierfabrikation 8/2024

3 T. Klemz, P. Fisera, IR Dryer as a Tool in the Press Section, Paper Technology International, p.16-21, Spring 2020

4 B.R. Read, P. Fisera, Up to 8% Reduction in Steam Consumption in the drying process of paper machines through Simulation Aided Control, Paper Technology International, p.14-17, Spring 2025

5 E. Knödler, Ökonomische Kühlung von Abwasser und Räumen als CO₂-Senke für Hochtemperaturwärmepumpen, IMPS 2025