

Physik und Anwendung elektrischer IR Strahler

Trocknung wässriger Dispersionen auf einem saugfähigen Substrat

Wolf Heilmann

Zellcheming Hauptausschuss COAT
München, 16. 04. 2024

Übersicht

-  Trocknung
-  Physik der Infrarotstrahlung
-  Praxiserfahrungen
-  Technologie der Strichtrocknung

Trocknung



- Lösungsmittel der Wahl des Papiermachers ist Wasser

Trocknung

- Ist ein zweistufiger Vorgang:
 - Energietransport in das Trockengut
 - Massetransport aus dem Trockengut
- Erst nach dem Massetransport ist die Trocknung abgeschlossen

Trocknung

- Wenn die Trocknung richtig durchgeführt wird ist die Steuerung nach Temperatur in md irrelevant für die Qualität des Endproduktes.
- Irre relevant ist die Steuerung der Temperatur in z-Richtung.

Trocknung

 Konduktion

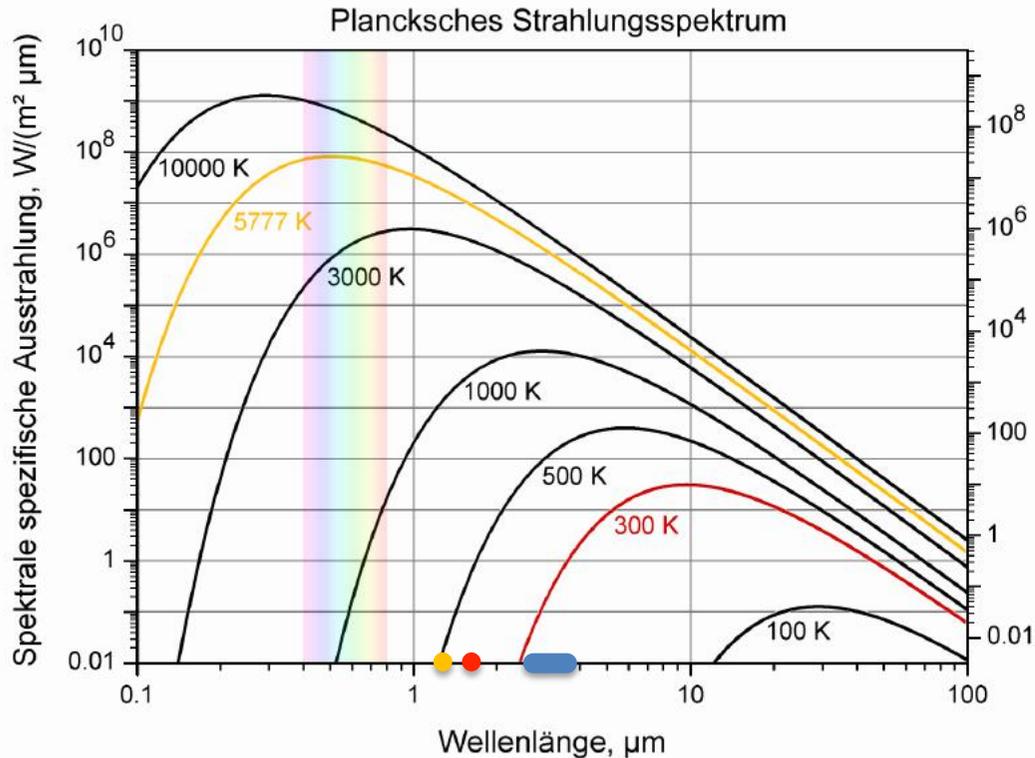
 Konvektion

 Radiation

Erwärmung mittels Radiation

- Wechselwirkung zwischen Strahlung und
 - Wasserstoffbrückenbindung
 - OH⁻-Gruppen
- Strahlung dringt unter die Oberfläche
- Teuerste Trocknungsenergie

Erwärmung mittels Radiation – 1.Schritt



Gasbetriebene IR-Strahler (Mittelwelle):
Strahlungsmaximum zwischen 2.5 und 3.5 μm
Wellenlänge, entsprechend 1.160 bis 830 K

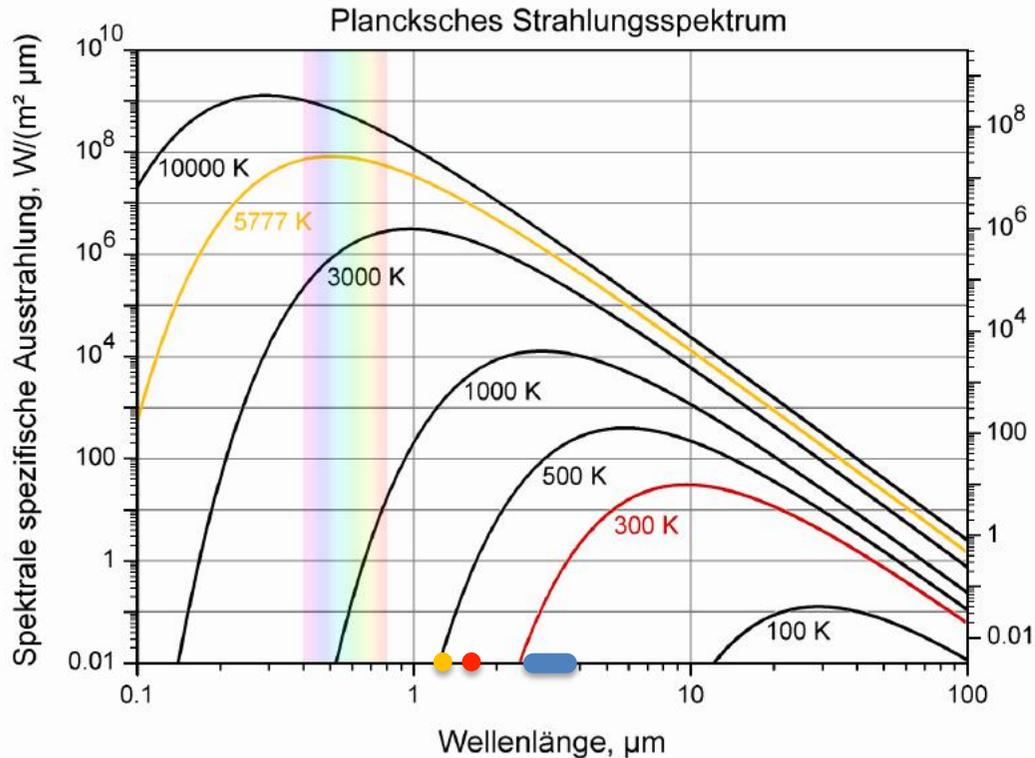
Standard elektrische NIR-Strahler (Kurzwellen):
Strahlungsmaximum bei 1.18 μm , entsprechend 2.450 K

Optimierte elektrische NIR-Strahler:
Strahlungsmaximum bei 1.45 μm , entsprechend 2.000 K.

1/3 der Energie wird bei kürzerer Wellenlänge, 2/3 bei längerer als dem Maximum ausgestrahlt

Temperaturen gemäß Stefan-Boltzmann und Wien'sches Verschiebungsgesetz

Erwärmung mittels Radiation – 1.Schritt



Die Energiedichte hängt in der 4. Potenz von der Temperatur in K ab

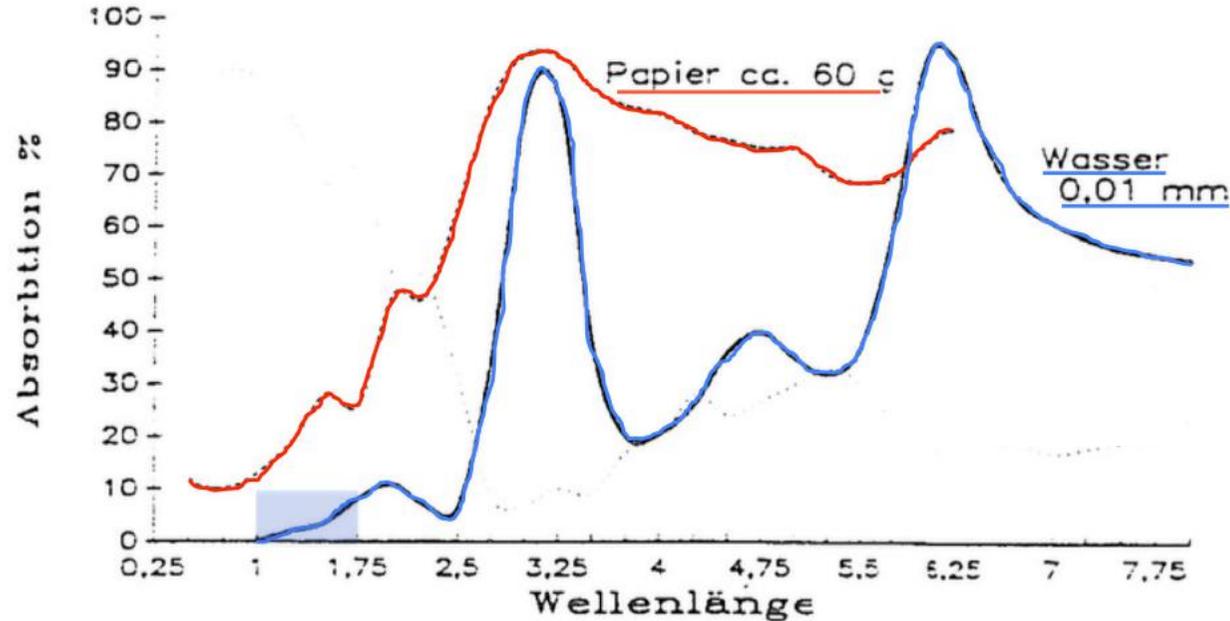
Gasbetriebene IR-Strahler: 1.160 bis 830 K

Standard elektrische NIR-Strahler: 2.450 K
d.h. rund 35fache Strahldichte

Optimierte elektrische NIR-Strahler: 2.000 K,
d.h. rund 16fache Strahldichte

-  Wie wird die Radiation in Wärme gewandelt?

Absorption infraroter Strahlung – 2.Schritt



Ein grundlegender Vortrag eines hervorragendes Fachmanns – Helmut Graab.

Aber fehlerbehaftet – was er aber 1991 nicht wissen konnte.

A b b. 7: IR-Reflexion und Absorption von Papier und Wasser

Source: Influence of emitter temperature of infrared emitters upon drying performance
Helmut Graab, *Wochenblatt für Papierfabrikation* 19/1991

Absorption infraroter Strahlung – 2.Schritt

Die Verwendung von Hochtemperaturstrahlern – ausschließlich elektrisch beheizte IR-Strahler – bringt keine Vorteile bei der Strichtrocknung. Der Hauptgrund ist die Wellenlängenverteilung mit ihrem Maximum bei ca. $1,2 \mu\text{m}$. Papier, Strich und Wasser absorbieren in diesem Bereich die Energie extrem schlecht. Weißes Papier und die Pigmente wirken in diesem Wellenlängenbereich als Spiegel, d. h. bei Wellenlängen unter $1,2 \mu\text{m}$ hat man zusätzlich mit Reflexion zu rechnen. Die Reflektoren unterhalb der Bahn wirken wie ein Spiegel und reflektieren ohne Änderung der Wellenlänge.

Ein grundlegender Vortrag eines hervorragendes Fachmanns – Helmut Graab.

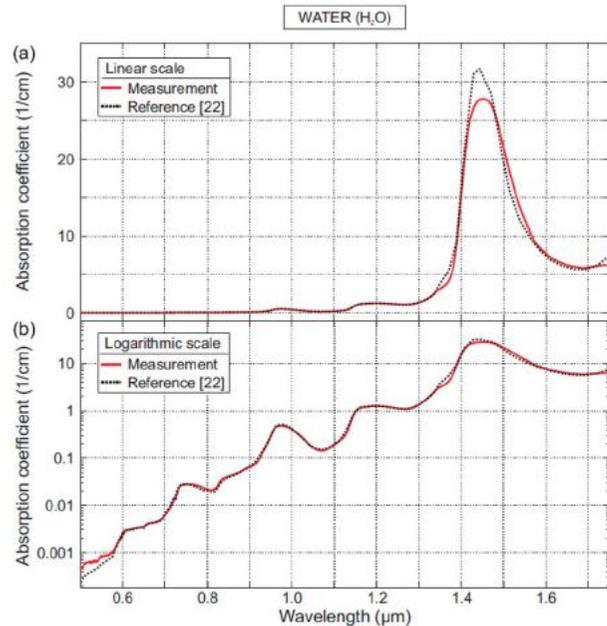
Aber fehlerbehaftet – was er aber 1991 nicht wissen konnte.

Wellenlänge

A b b. 7: IR-Reflexion und Absorption von Papier und Wasser

Source: Influence of emitter temperature of infrared emitters upon drying performance
Helmut Graab, *Wochenblatt für Papierfabrikation* 19/1991

Absorption infraroter Strahlung – 2.Schritt



2001 und 2002 wurde die Absorption von NIR Infrarotstrahlung in Wasser exakt vermessen.

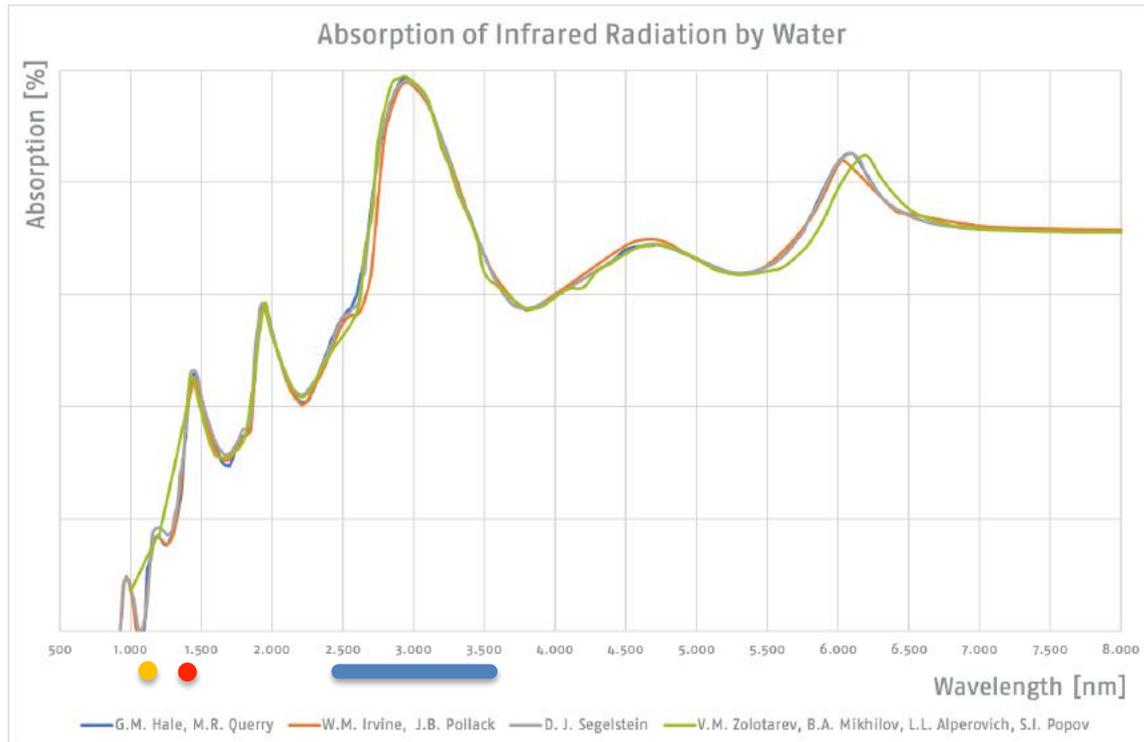
Ein Absorptionspeak bei 1,44 μm bzw. 1,45 μm.

Dieser ist relevant für **optimale** Strichtrocknung.

Fig. 16. Measured absorption coefficient of liquid distilled water at a temperature of 20 °C on (a) linear and (b) logarithmic scale as a function of wavelength. For comparison to our measured values (solid red line) we also plotted linearised reference data (dashed black line) from Ref. [22] ([Media 1](#)).

22. M. J. Weber, "Section 5: Liquids," in *Handbook of Optical Materials*, (CRC Press LLC, Boca Raton, 2003), pp. 373–393.

Absorption infraroter Strahlung – 2.Schritt

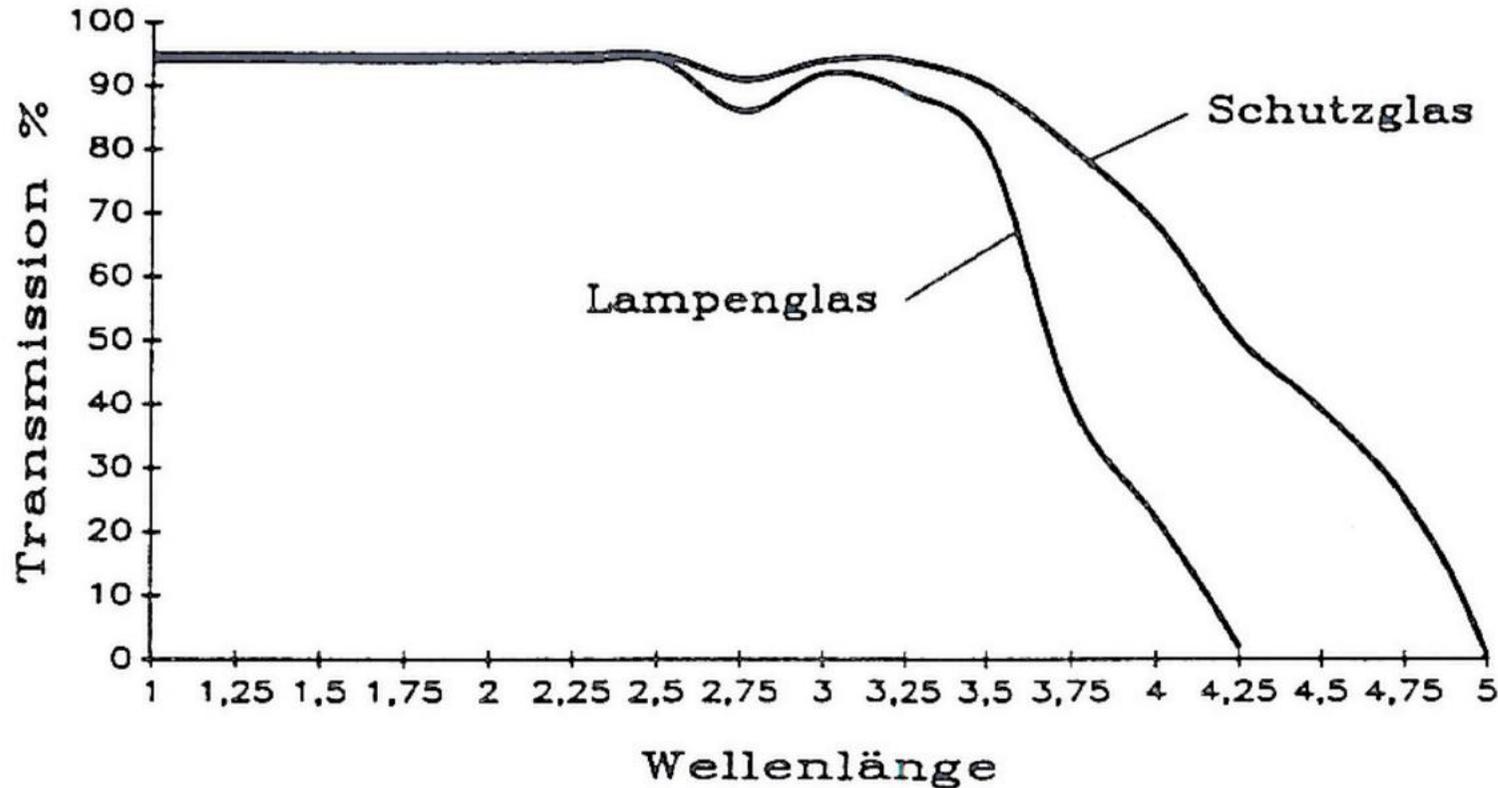


Aber es gab schon ältere exakte Vermessung der Interaktion zwischen Infrarotstrahlung und Wasser in fester, flüssiger und Gasform.

Mit allen Peaks bei rund $1,45\mu\text{m}$, $1,95\mu\text{m}$, $2,95\mu\text{m}$, $4,7\mu\text{m}$ und $6,1\mu\text{m}$.

Aber verstauben in analoger Form in irgendwelchen Universitätsbibliotheken.

Absorption infraroter Strahlung – 2.Schritt



A b b. 3: Transmission von Quarzglas als Funktion der Wellenlänge

Source: Influence of emitter temperature of infrared emitters upon drying performance
Helmut Graab, *Wochenblatt für Papierfabrikation* 19/1991

Ein grundlegender Vortrag eines hervorragenden Fachmanns – Helmut Graab.

Aber fehlerbehaftet – was er aber 1991 nicht wissen konnte.

Laut ihm eignen sich elektrische Strahler nicht, weil Lampen- und Schutzglas den oberen Teil der MIR absorbieren.

Absorption infraroter Strahlung – 2.Schritt

Eingangs waren wir fasziniert von der Verdoppelung von $T =$ Verzehnfachung der Leistung. Aus technischen Gründen – Strahleranordnung etc. – ist aber die Leistungsaufnahme bei kommerziellen Elektrostrahlern nur 2-3 mal höher als die eines gasbetriebenen Strahlers. 60% dieser Energie werden, wie wir gesehen haben, gar nicht absorbiert. Die Quarzglasscheibe macht oberhalb $4 \mu\text{m}$ für IR-Strahlung zu. Dies alles zusammengenommen schätzten wir eine Leistungsverbesserung von 15% gegenüber einem Niedertemperaturstrahler, bezogen auf die gleiche Strahlerfläche, ab.

Eines konnten wir nicht theoretisch abhandeln und eine **Wellenlänge**

A b b. 3: Transmission von Quarzglas als Funktion der Wellenlänge

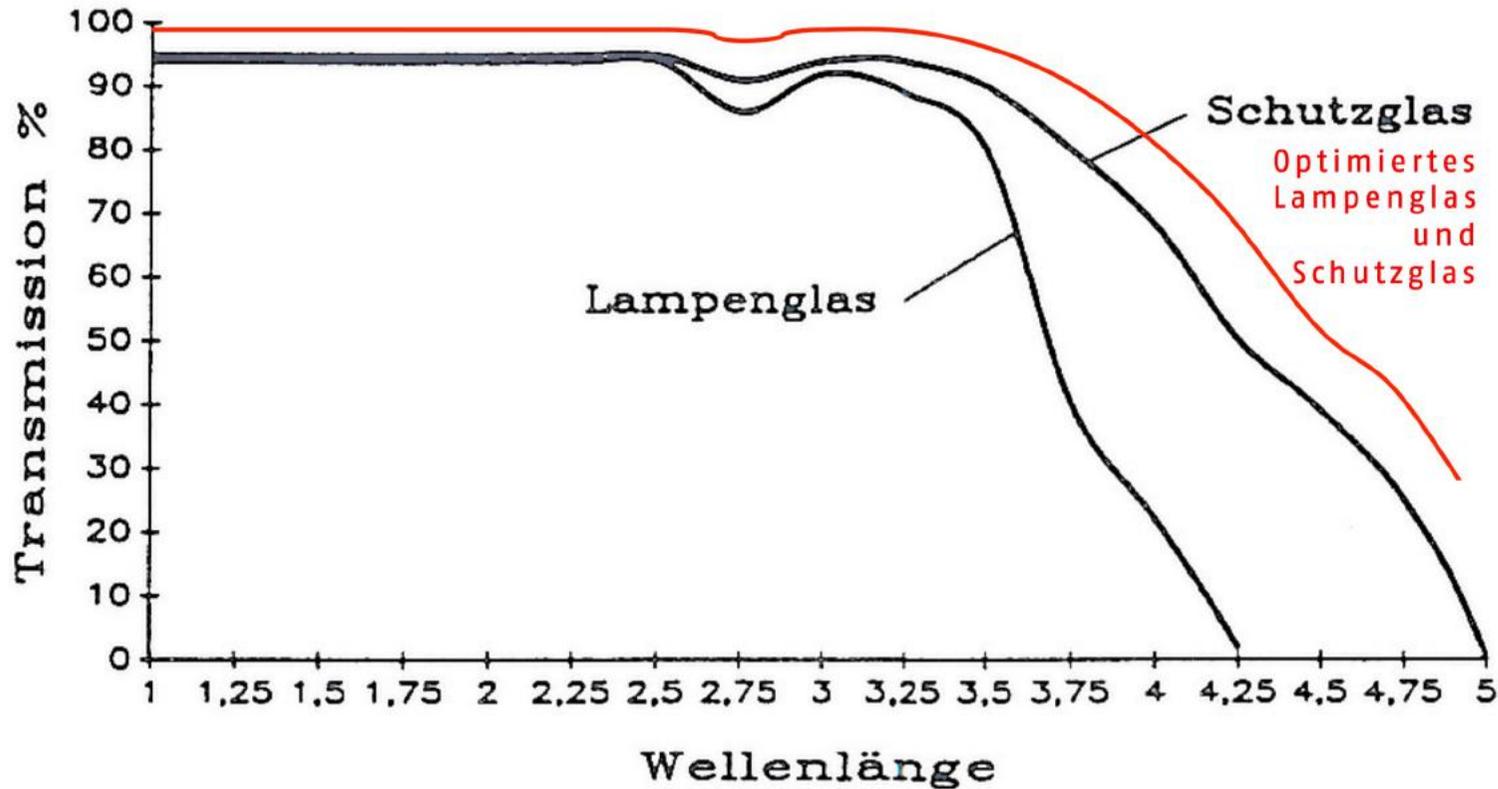
Source: Influence of emitter temperature of infrared emitters upon drying performance
Helmut Graab, *Wochenblatt für Papierfabrikation* 19/1991

Ein grundlegender Vortrag eines hervorragenden Fachmanns – Helmut Graab.

Aber fehlerbehaftet – was er aber 1991 nicht wissen konnte.

Laut ihm eignen sich elektrische Strahler nicht, weil Lampen- und Schutzglas den oberen Teil der MIR absorbieren.

Absorption infraroter Strahlung – 2.Schritt



Man kann aber auch ein anderes Glas als alle anderen Lampenhersteller verwenden.

Mit sehr hoher Durchlässigkeit für Infrarotes Licht.

Für Lampen und Schutzglas.

A b b. 3: Transmission von Quarzglas als Funktion der Wellenlänge

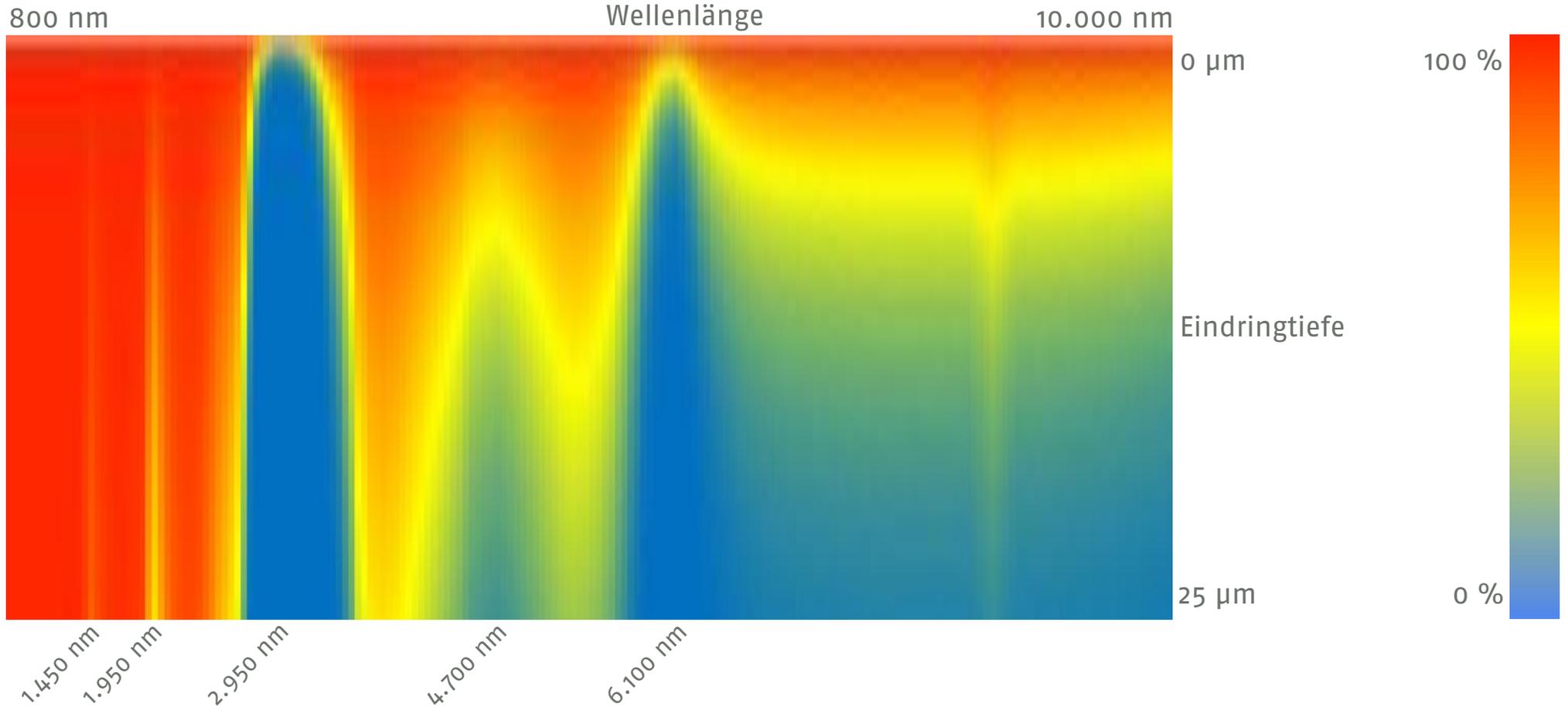
Source: Influence of emitter temperature of infrared emitters upon drying performance
 Helmut Graab, *Wochenblatt für Papierfabrikation* 19/1991

 Und wo entsteht die Wärme?

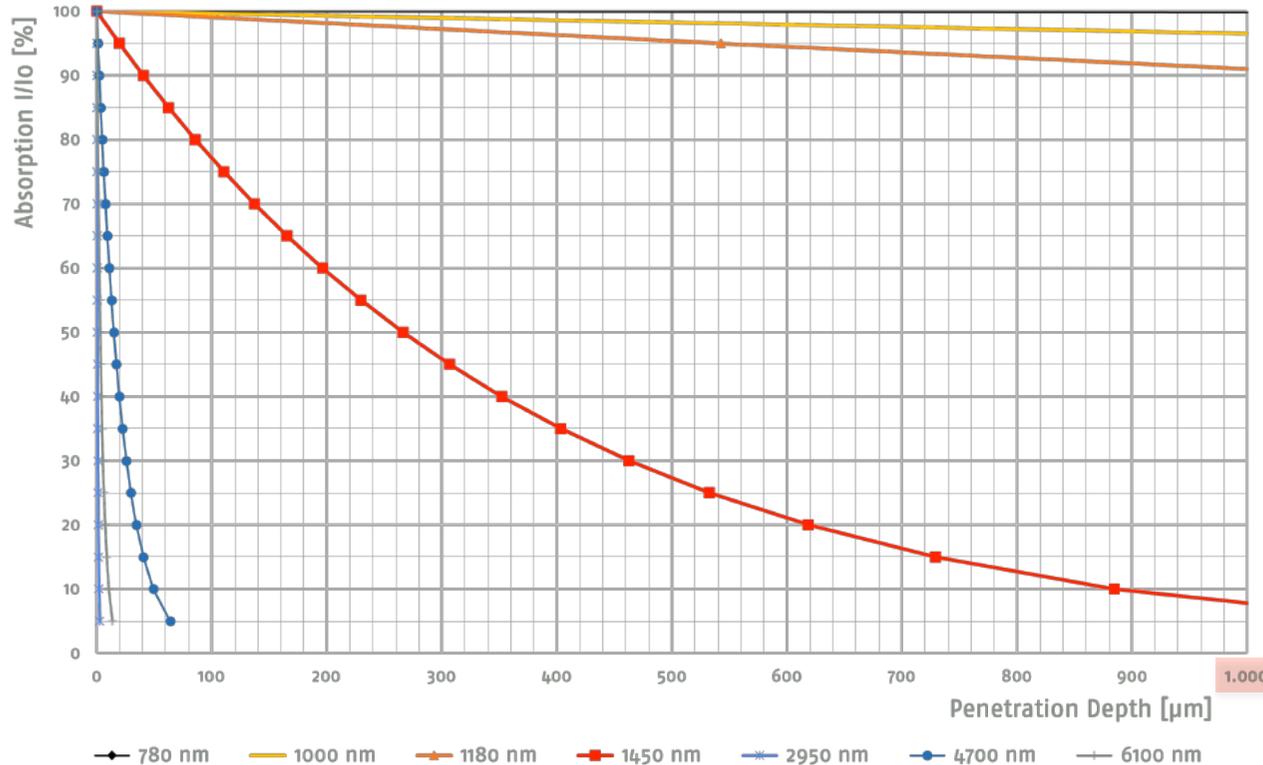
Penetration gemäß Lambert-Beer – 3.Schritt



Penetration gemäß Lambert-Beer – 3.Schritt



Penetration gemäß Lambert-Beer – 3.Schritt

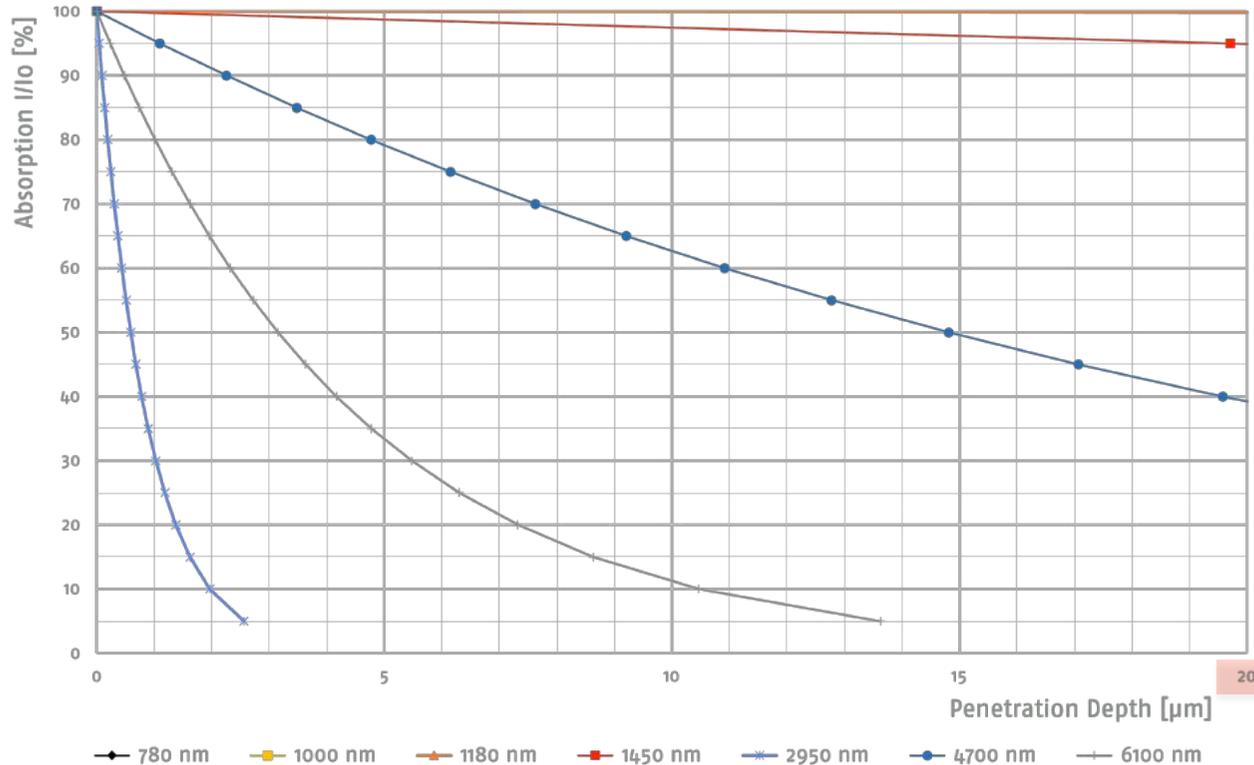


Strahlung elektrisch betriebener NIR Strahler (Strahlungsmaximum bei 1,18 µm) dringt sehr tief ein bei sehr geringer Absorption.

Strahlung optimierter elektrisch betriebener NIR Strahler (Strahlungsmaximum bei 1,45 µm) dringt tief in das Substrat ein bei starker Absorption.

Infrarotstrahlung gasbetriebener Strahler wird innerhalb weniger µm absorbiert. Es wird praktisch nur die Oberfläche erwärmt.

Penetration gemäß Lambert-Beer – 3.Schritt

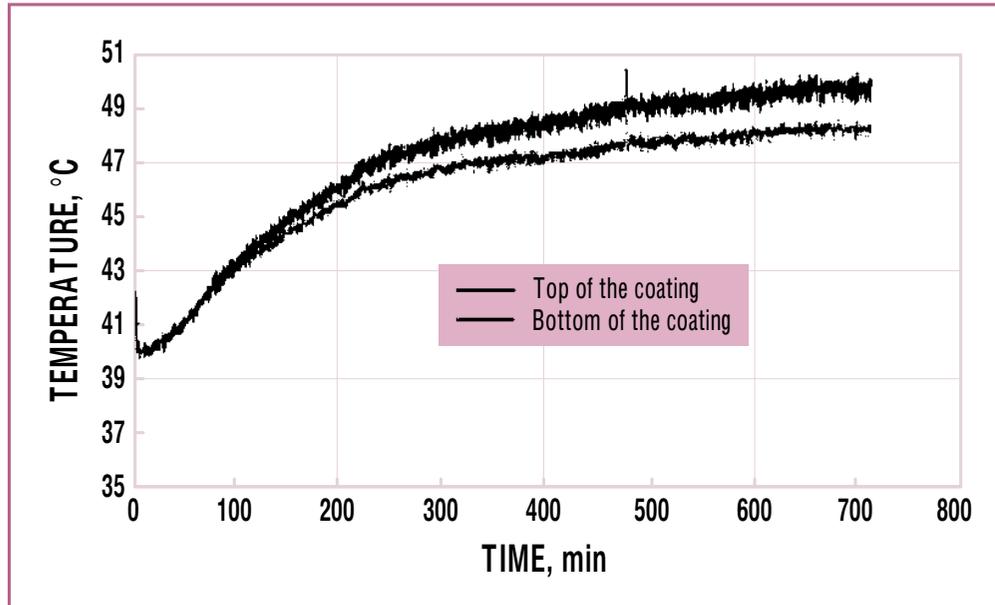


Infrarotstrahlung gasbetriebener Strahler wird innerhalb weniger µm absorbiert.

Gas ist sehr günstig und gleichzeitig extrem teuer.

Heißluft ist viel besser, weil sie die Oberfläche genau so gut erwärmt.

Penetration gemäß Lambert-Beer – 3.Schritt



4. Evolution of the temperature at the top and bottom of the coating; a 60°C drying experiment without dewatering simulation.

- Hydrocarb (carbonates): $C_c = 27\%$
- a-gloss (kaolins): $C_k = 27\%$
- Latex: $C_{lat} = 8\%$
- Starch: $C_s = 3\%$
- Liquid (water): $C_L = 35\%$.

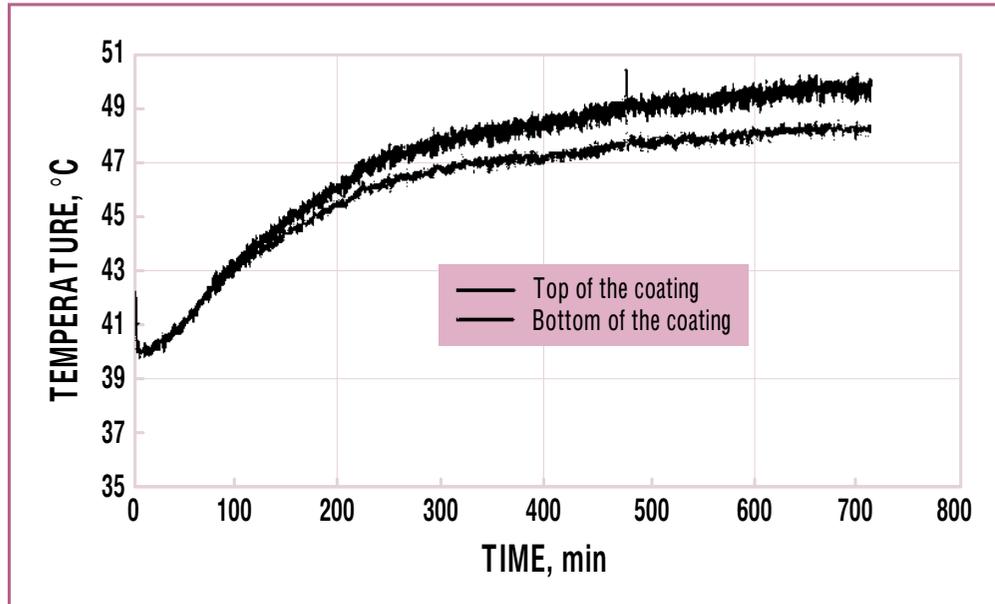
Drying and dewatering

To reproduce the coating dewatering, a liquid flux toward the bottom of the coating was created by imposing vacuum conditions at the lower boundary of the coating sample. The complete experimental setup (drying and dewatering) is shown in Fig. 1. The setup includes:

- An infrared dryer with adjustable temperature (50–160°C)

The thickness of the samples (1 cm) is intentionally much greater than that used in industrial processes (approx. 20 μm). This is because determining moisture content or starch content profiles requires cutting the samples to slices, which cannot be executed on very thin coatings.

Penetration gemäß Lambert-Beer – 3.Schritt



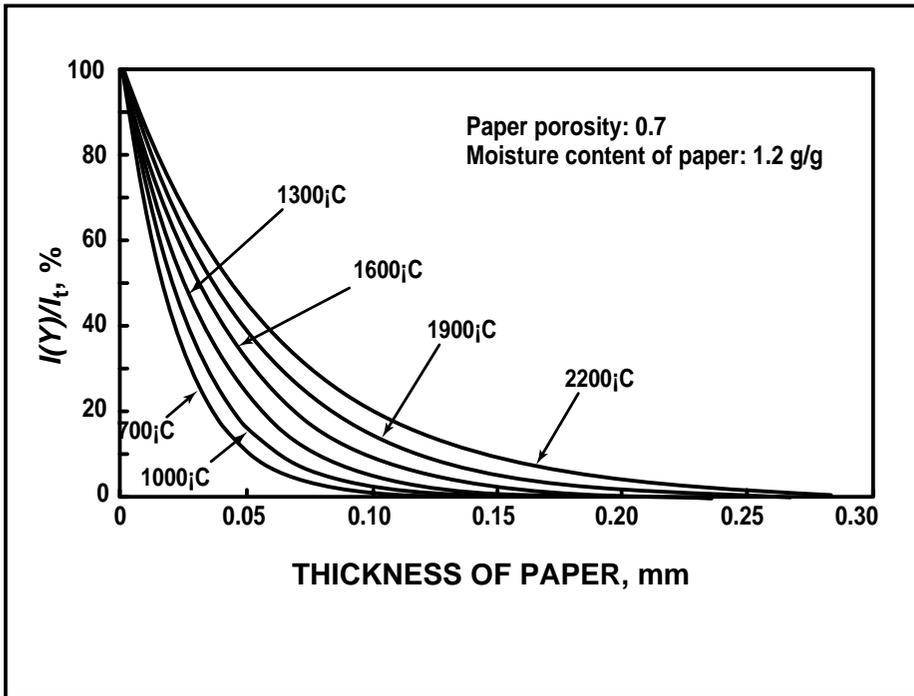
4. Evolution of the temperature at the top and bottom of the coating; a 60°C drying experiment without dewatering simulation.

- Verwendet wurden Infrarotlampen, die für die Versuche gedimmt wurden auf 50°C bis 160°C, also Strahlungsmaximum zwischen 7 und 8 μm .
- Über 90% der Energie erwärmte die obersten 10 μm von 1.000 μm .
- Man erkennt, wie die Konduktion die Sedimentschicht langsamer erwärmt als die Radiation die Oberfläche.
- Die Ergebnisse sind irrelevant für die optimale Strichtrocknung!

Penetration gemäß Lambert-Beer – 3.Schritt

4. IR energy attenuation as a function of paper thickness at various IR emitting surface temperatures

- Je höher die Temperatur des Strahlers desto tiefere Penetration in das Trockengut



Penetration gemäß Lambert-Beer – 3.Schritt

Ein einfacher Versuch gibt bereits gute Anhaltspunkte dafür, nämlich die Bahntemperatur nach Verlassen der Infrarotstrahlereinheit. Bei keinem unserer Versuche haben wir mit Hochtemperaturstrahlern Bahntemperaturen gefunden, die wir von Niedertemperaturstrahlern gewohnt sind.

Unsere Ergebnisse stehen damit im Widerspruch zu den Aussagen von Bjornberg², der feststellte, daß bei kürzer werdender Wellenlänge die Strahlung tiefer ins Papier eindringt und aus diesem Grunde die Bahntemperatur keinen Hinweis auf die absorbierte Energie bei Hochtemperaturstrahlern erlaubt.

Unsere praktischen Versuche haben gezeigt, daß diese Feststellung von Bjornberg falsch ist.

 Aber woher weiß das Wasser, wo es hin soll?

Massetransport aus dem Strich – 4.Schritt

- Das Wasser des Strichs muss an die Oberfläche gebracht werden.
- Dort sättigt der Dampf die laminare Grenzschicht und verhindert weitere Verdampfung.
 - Die laminare Grenzschicht muss turbulent gestört werden.
 - Sie muss möglichst warm sein.
 - Sie muss möglichst trocken sein.

Massetransport aus dem Strich – 4.Schritt

- Wasser, dass in das Substrat migriert, muss nach dem Trocknen des Strichs verdampft werden – mit hohem Energieaufwand:
 - Abbremsen des Wassers bei der Migration
 - Überwinden der Wasserstoffbrückenbindung
 - Beschleunigen des Wassers an die Oberfläche
 - Durchqueren des getrockneten Strichs.

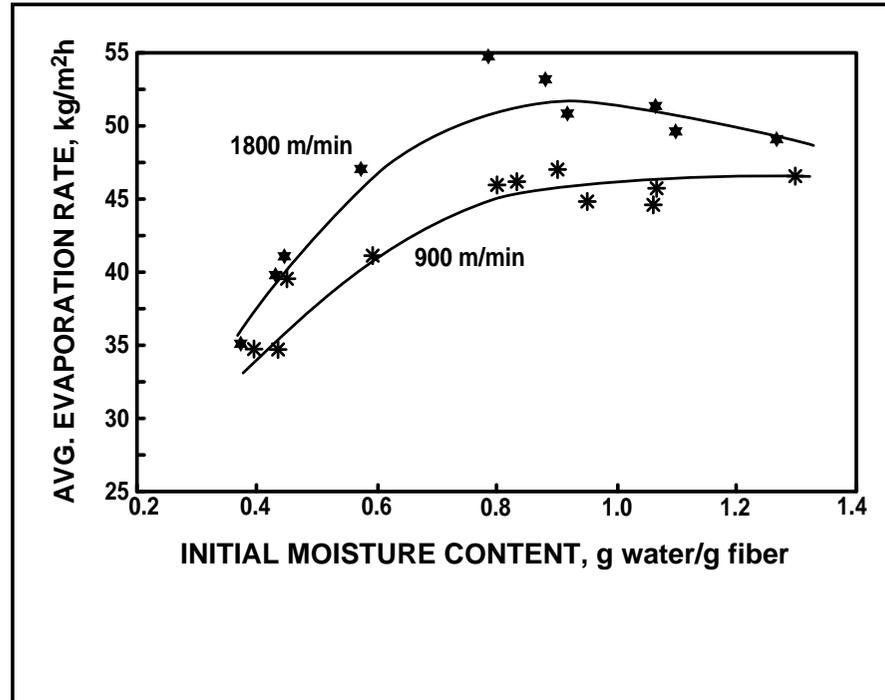
Massetransport aus dem Strich – 4.Schritt



- Wie verhindere ich das Wegschlagen der flüssigen Phase?

Massetransport aus dem Strich – 4.Schritt

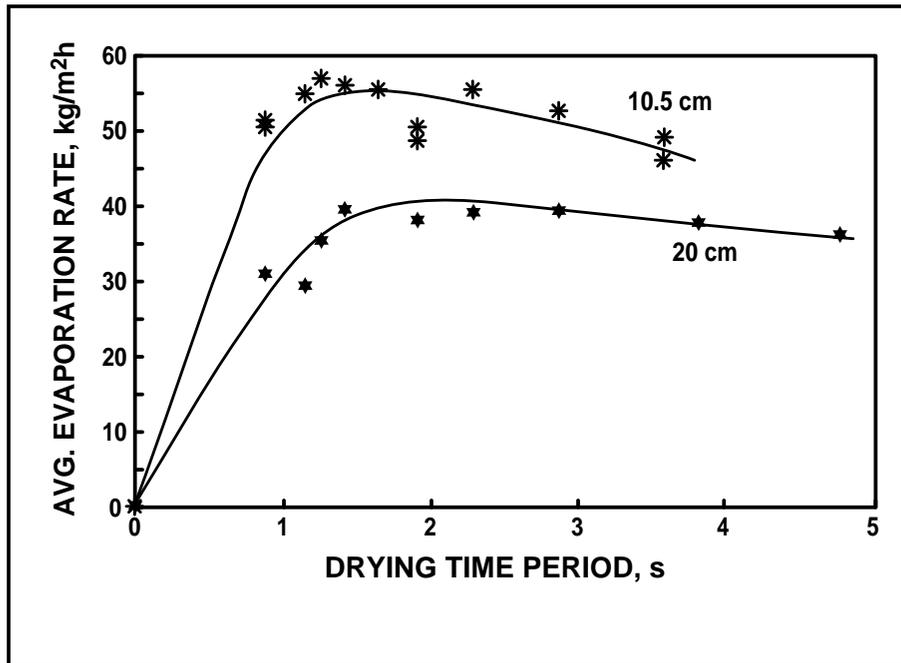
12. Variation of average evaporation rate as a function of initial moisture content of paper sheet at different blowing air velocities (IR emitting surface temperature: 100°C)



- Je höher die Geschwindigkeit der Luft, die die Laminarschicht stört, desto höher die Verdampfung

Massetransport aus dem Strich – 4.Schritt

10. Variation of average evaporation rate as a function of drying time period in each passage of the paper sheet through the IR heater at two different exposure distances (IR emitting surface temperature: 1100°C)



- Je dichter der Strahler auf der Papierbahn sitzt, desto höher wird die Verdampfung
- Aber nicht wegen dem geringeren Abstand zum Strahler, sondern weil die Turbulenzen zwischen Strahler und Bahn sich verstärken

Praxiserfahrungen

- Booster für Strichtrocknung
- Booster für Barrieretrocknung
- Vorwärmung

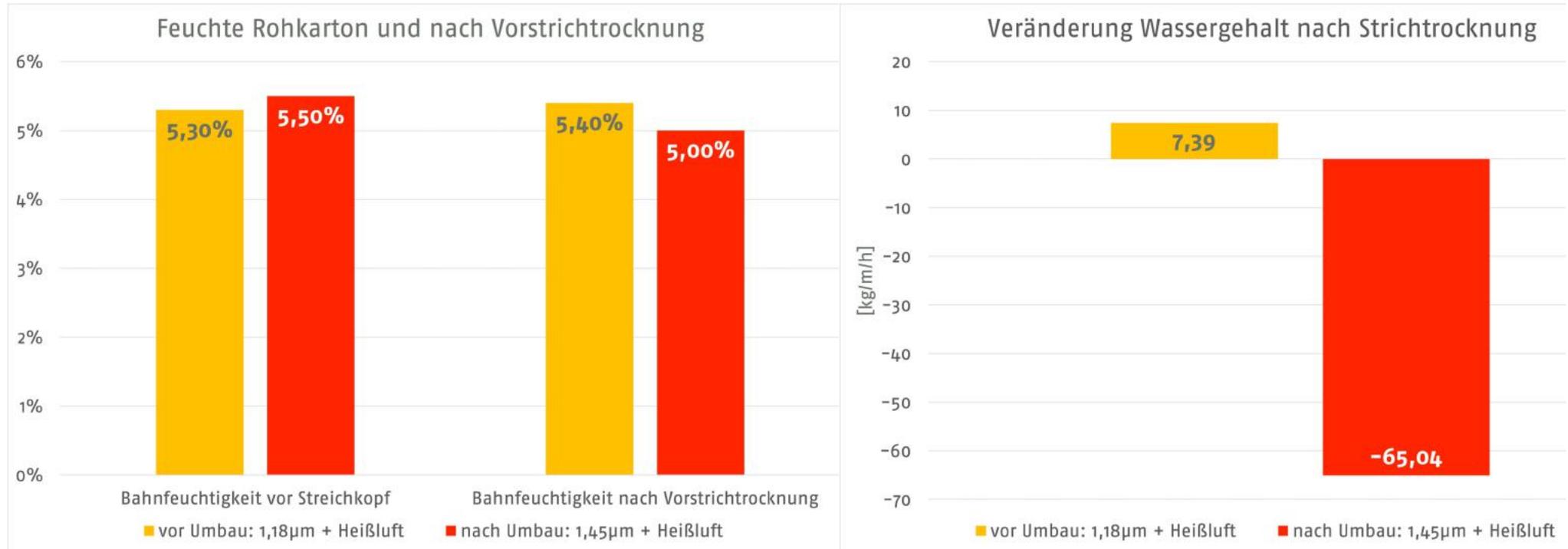
Praxiserfahrung Strichtrocknung

- Kartonmaschine mit 2+2 Strichen online
- Elektro-IR mit 1,18 μm Wellenlänge
 - Vorstrichgewicht 13 g/m² mit FK 69% bis 71%
 - Pro Vorstrich 2 Reihen mit 28 Modulen à 30 kW
 - Gesamt 1,680 MW installierte Leistung pro Strich
- Gefolgt von 2 Heißlufthauben

Praxiserfahrung Strichtrocknung

- Elektro-IR mit 1,45 µm Wellenlänge
- Vorstrichgewicht 13 g/m² mit FK 69% bis 71%
- Pro Strich 2 Reihen mit 28 Modulen à 24 kW
- Gesamt 1,344 MW installierte Leistung pro Strich
- Gefolgt von 2 Heißluftthauben
- 20% geringere installierte Leistung

Praxiserfahrung Strichtrocknung



Praxiserfahrung Strichtrocknung

- Kurze Wellenlänge erwärmt vor allem Substrat.
- Wellenlänge ist lang genug, mit 50% weniger Verlustleistung als Standard NIR.
- Turbulente Störung der Laminarschicht während Bestrahlung kann mehr Dampf abführen wie durch Bestrahlung entsteht
- Verdampfungsenthalpie kühlt die Oberfläche.
- Temperaturdifferenz zwischen initialer Sedimentschicht und Oberfläche garantiert Massentransport an die Oberfläche.

Praxiserfahrung Booster Barrieretrocknung

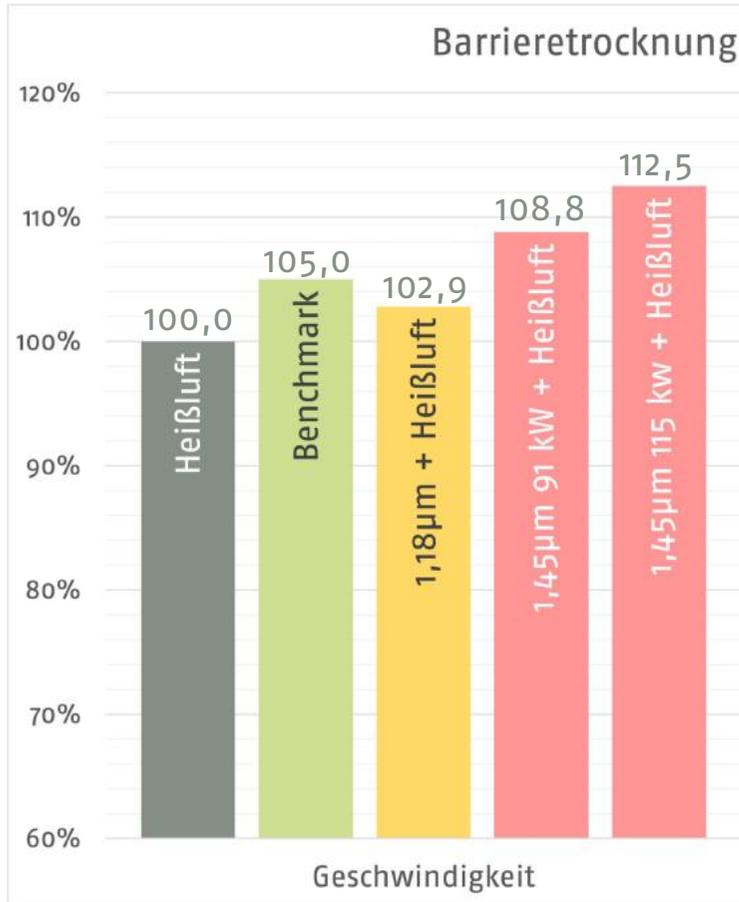


- Barriere basierend auf hochviskosem PVA
- Streichmaschine mit mehreren Streichköpfen auf beiden Papierseiten.
- 5 Heißlufthauben zur Trocknung des PVA-Strichs.
- Geschwindigkeitsbegrenzung durch Trocknung des PVA-Strichs.

Praxiserfahrung Booster Barrieretrocknung

- Elektro-IR mit 1,45 μm Wellenlänge vor Heißlufthauben installiert.
- Reflektor auf Rückseite um Energieverluste zu minimieren.
- Benötigter Einbauraum md: 50 cm
- Installierte Kapazität: 160 kW/m Arbeitsbreite

Praxiserfahrung Booster Barrieretrocknung

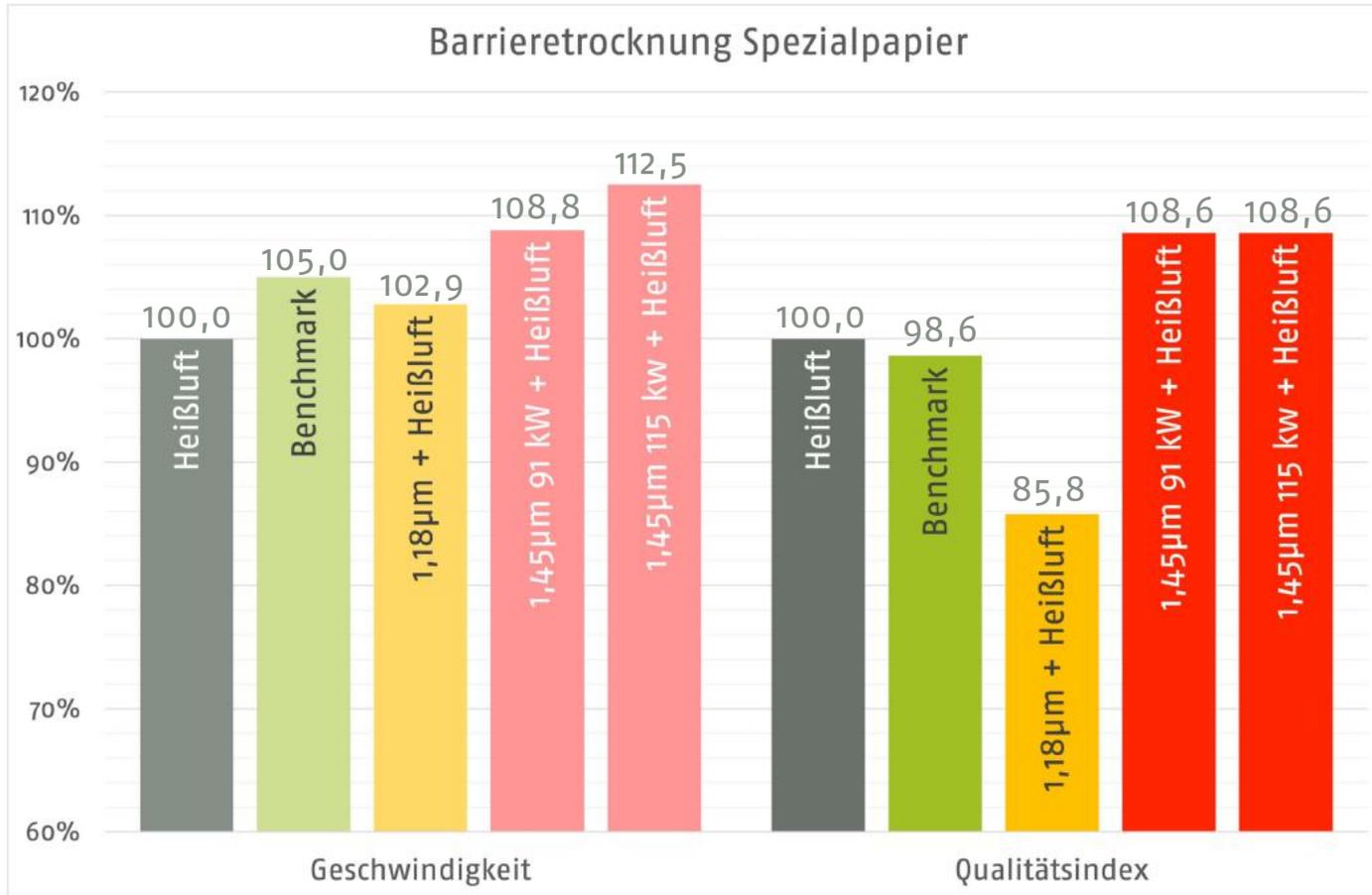


Elektrischer IR mit Wellenlänge 1,18µm erlaubt nur geringfügige Steigerung

Gasstrahler mit 3µm sind Barrierekiller, wurden vom Kunden nicht evaluiert.

Elektrischer IR mit Wellenlänge 1,45µm ermöglicht signifikante Geschwindigkeitssteigerung

Praxiserfahrung Booster Barrieretrocknung

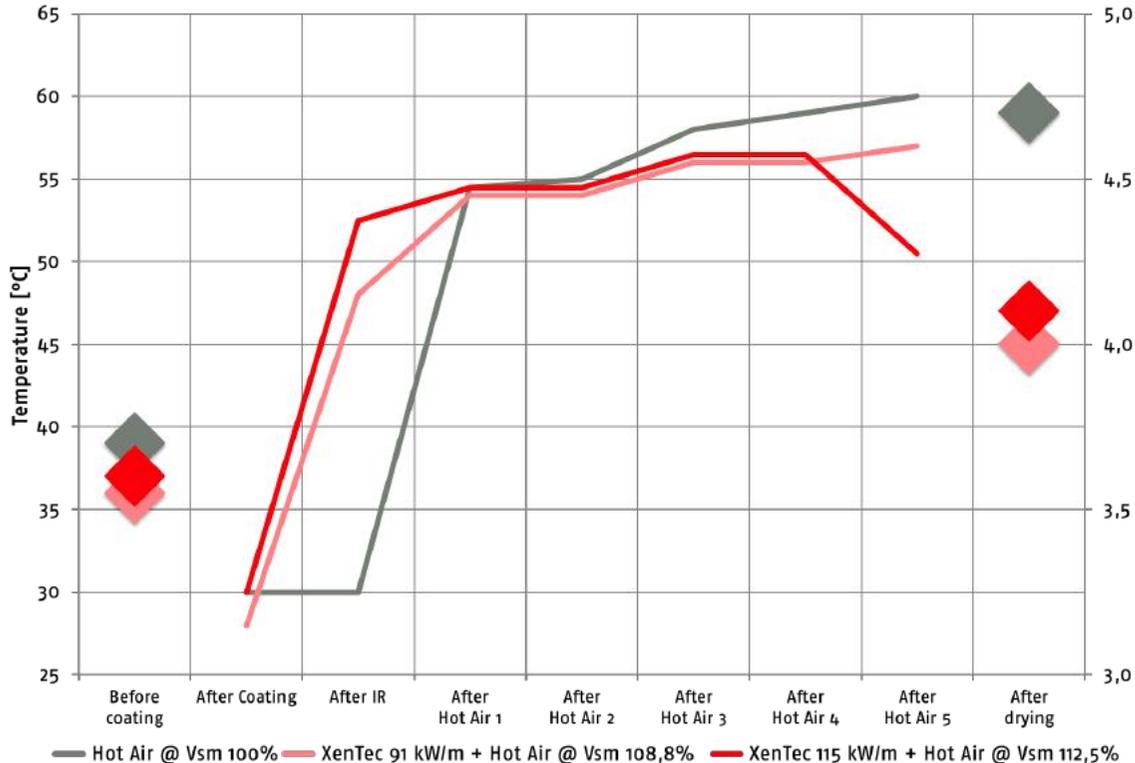


Wellenlänge 1,18µm verschlechtert Qualität.

Wellenlänge 1,45µm ermöglicht gleichzeitig Geschwindigkeitssteigerung und Qualitätsverbesserung durch Trocknung von der initialen Sedimentschicht aus und Verfilmung der Oberfläche erst, wenn alles darunterliegende Wasser verdampft wurde.

Praxiserfahrung Booster Barrieretrocknung

Temperature and Moisture with XenTec Booster



— Temperatur ◆ Feuchte

Qualitätsverbesserung aufgrund niedrigerer Temperatur

Optimierte Verdampfungsrate ergibt verbesserte Kühlung des Strichs

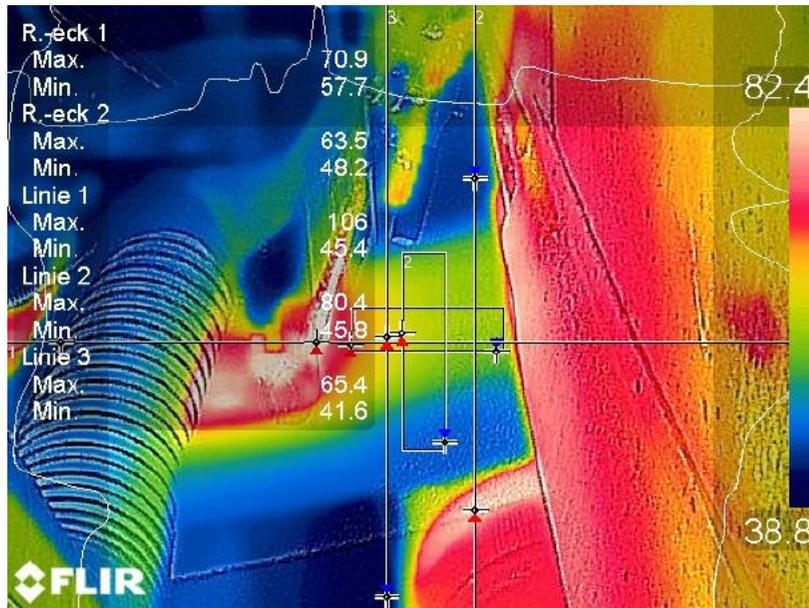
Trocknung von der initialen Sedimentschicht ausgehend

Kein Risiko verfrühter Verfilmung an der Oberfläche des Strichs

Maschine könnte weitere 20% vorgefahren werden

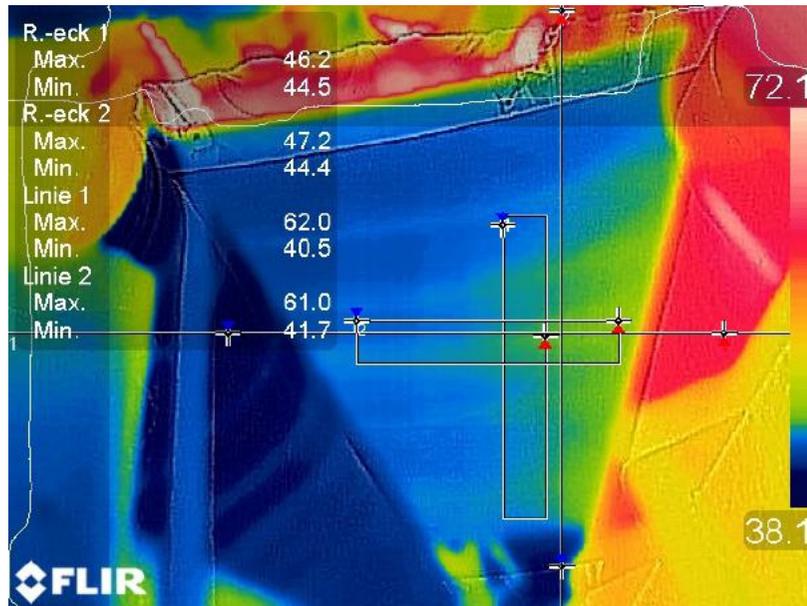
Praxiserfahrung Vorwärmung

- Hier Thermographien von Betriebsversuch mit einseitigem Bestrahlen einer Pappe (1.400 g/m², 2.000 µm) am Einlauf der Trockenpartie – Ansicht von Oberseite



Praxiserfahrung Vorwärmung

- Hier Thermographien von Betriebsversuch mit einseitigem Bestrahlen einer Pappe am Einlauf der Trockenpartie – Ansicht von Unterseite



Technologie



- Compact Engineering entwickelt und fertigt Wendeln und Lampen selbst
- Wellenlängengipfel bei 1,45 μm unter Vollast
 - optimal zur Überwindung der Wasserstoffbrückenbindung
 - Optimal zur Trocknung aus der Tiefe für verringerte Binder- und Feinstoffmigration

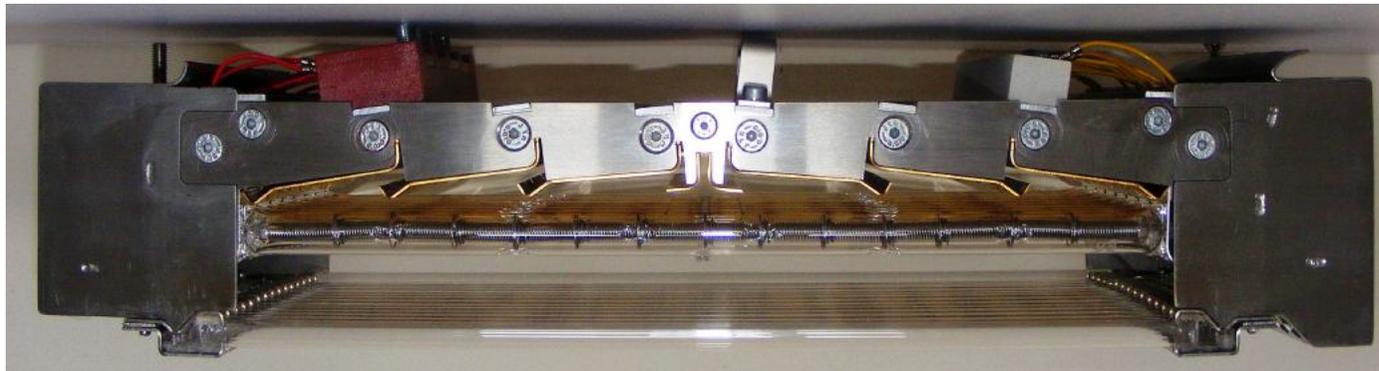
Technologie

- Spezielles Glas, mit extrem niedriger Absorption der Infrarotstrahlung
- Auch für Schutzröhren
- Schutzgas Xenon
- Garantiert 15.000 Betriebsstunden bei Vollast (typisch ansonsten 5.000 h)
- Goldreflektor
- Aktives Grenzflächenmanagement der Laminarschicht

Spezielles Glas



Compact XenTec-Strahlerelement



 Vielen Dank

 Fragen?