

MÖGLICHKEITEN DER PROZESSBESCHLEUNIGUNG DURCH ABLEITUNG DER KERNTemperatur AUS DER GEMESSENEN OBERFLÄCHENTEMPERATUR

„Der Einsatz berührungsloser Temperaturmessungen ist in Produktionsprozessen auf die Oberfläche der zu verarbeitenden Materialien begrenzt. Um diese Grenze zu überwinden wird hier eine Methode vorgestellt, mit der es möglich ist, aus Untersuchungen zum Wärmefluss von der berührungslos ermittelten Temperatur und anderen Daten zuverlässig auf die Kerntemperatur zu schließen. Diese Informationen lassen sich zur besseren Regelung und Beschleunigung der Prozesse verwenden.“

Das hier vorgestellte Modell stimmt mit experimentell ermittelten Daten in der Reifenproduktion überein. Im konkreten Fall führte die Installation von einigen hundert berührungslos messenden Systeme zu erheblichen Verbesserungen beim Durchsatz, indem der Zeitaufwand für die Vulkanisierung spürbar reduziert werden konnte. Das Verfahren lässt sich auf andere thermische Prozesse übertragen, z.B. in der Lebensmittelindustrie oder in Druck- und Laminiermaschinen.

Empirischer Ansatz bei der Reifenproduktion

Bei thermischen Bearbeitungsschritten gibt es das grundsätzliche Problem, dass in der Regel die Temperatur des Ausgangsmaterials nicht ausreichend beachtet wird. Beispielsweise kann das Material aus einem kalten oder heißen Lagerraum kommen oder die Temperatur einfach aufgrund der Jahreszeiten stark schwanken; es kann gerade vom Lkw angeliefert worden oder von irgendwo in der Fabrik - ohne definitiv auf der Umgebungstemperatur zu sein, für die der Bearbeitungsprozess ausgelegt ist.

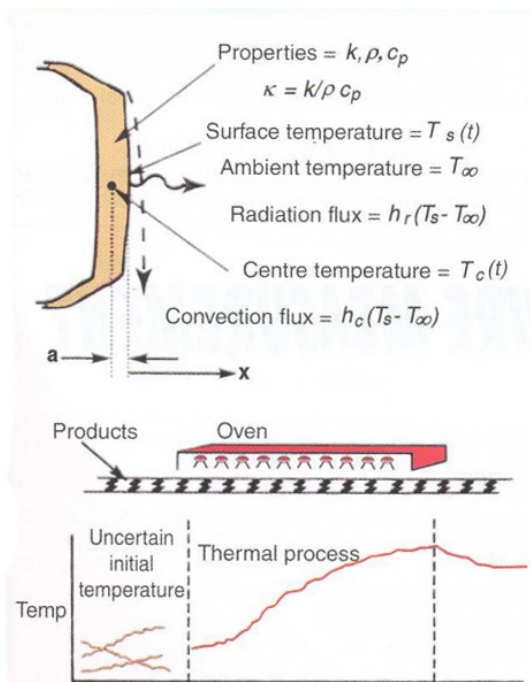


Bild 1: Temperaturverlauf eines Produkts auf seinem Weg durch einen Durchlaufofen

In Bild 1 wird ersichtlich, dass die optimale Führung einer Wärmebehandlung je nach Anfangstemperatur unterschiedlich sein sollte. Der Durchlauf könnte bisweilen deutlich schneller verlaufen oder der Aufheizprozess im Durchlaufofen könnte anders geregelt werden. Ohne Messungen muss die Prozessführung vom schlechtesten Fall ausgehen, was bezüglich Zeit zu deutlich sub-optimalen Ergebnissen führt.

Für Nichtmetalle ist die berührungslose Messung der Oberflächentemperatur nicht ausreichend, denn im Inneren eines Werkstücks können bis zur Oberfläche erhebliche Temperaturgradienten auftreten. Um die Kerntemperatur trotzdem von außen zu ermitteln ist eine etwas aufwändigere, aber fabriktaugliche Messanordnung für einfach zu ermittelnde Messgrößen erforderlich.

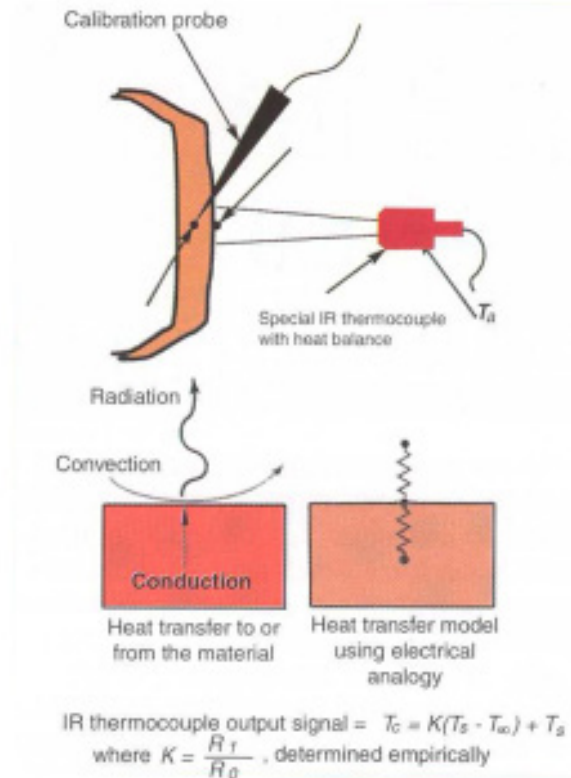


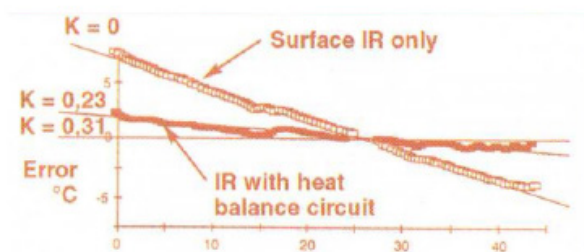
Bild 2: Infrarot Thermoelement mit integrierter Charakteristik entsprechend der Zustandsgleichung für die Wärmeleitung im Reifen. Die Kalibriersonde wird anfänglich zur Bestimmung des Koeffizienten K verwendet.

Als praktisches Beispiel wurde eine spezielle Aufgabe beim Vulkanisieren von Reifen genauer untersucht. Der Temperaturverlauf beim Vulkanisieren entspricht in etwa der in Bild 1 dargestellten Kurve, allerdings verläuft der Prozess nicht kontinuierlich. Reifen werden in speziellen Formen unter Druck und Hitze "gekocht". Durch Messungen der Temperatur an den Rohlingen unmittelbar vor der

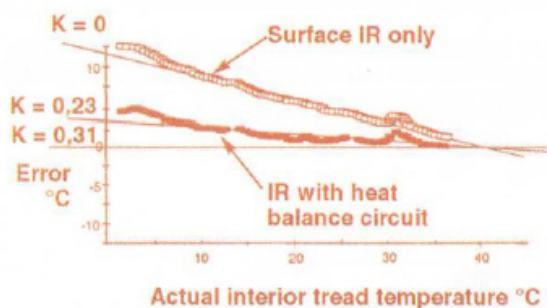
Vulkanisierung konnte die Zeit in der Presse auf maximalen Durchsatz optimiert werden. Eine derartige Optimierung der Produktionskapazität - fast ohne Investitionen - ist für eine 100 Mio.-Dollar-Anlage eine angenehme Aussicht.

Erste Versuche machten schnell deutlich, dass die ausschließliche Bestimmung der Oberflächentemperatur zu nicht hinnehmbaren Toleranzen führt. Daraufhin wurde ein Messkonzept entsprechend Bild 2 vorgeschlagen, das einer einfachen Zustandsgleichung für die Wärmebilanz an der Reifenoberfläche folgt. Die Innentemperatur der Reifen kann so mit einem einfachen Infrarot-Sensor ausreichend genau erfasst werden.

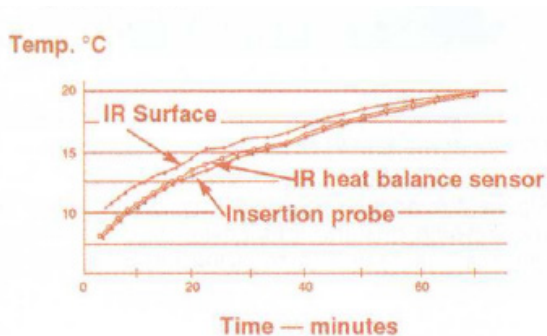
Infrarot-Thermoelemente wurden mit einem Wärmeausgleich versehen und entsprechend Bild 2 mit dem korrekten Wert für K kalibriert. warmed by storage in hot warehouse prior to vulcanising. Diese Messsonden wurden in der Reifenfabrik installiert und konnten die Innentemperatur der Reifen sehr gut darstellen (siehe Bild 3).



(a) Daten für Reifen, die aus der Kühlanlage auf Umgebungstemperatur gebracht wurden



(b) Daten für Reifen, die aus der Kühlanlage in den Ofen gebracht wurden



(c) Temperatur-/Zeit-Verlauf für Reifen, die aus der Kühlanlage auf Zimmertemperatur gebracht wurden

Bild 3: Gemessene Abweichung zwischen Infrarot Thermoelement und der tatsächlichen Reifentemperatur. Der anfängliche Schätzwert war $K = 0,23$. Mit $K = 0,31$ wird der Fehler praktisch auf Null reduziert.

Nach diesen Erfolg versprechenden Ergebnissen wurden

hunderte Pressen mit derartigen Messsonden ausgerüstet. Über den Zeitraum von etwa sieben Jahren sorgten die Messsonden für einen um 10 % gesteigerten Durchsatz. Die Wirkung zeigte sich besonders im Sommer, wenn die Rohlinge zur Vulkanisierung aus überhitzten Warenlagern angeliefert wurden.

Obwohl die Messanordnung in der Praxis gute Ergebnisse brachte, beruhte sie doch bis dahin auf rein empirischen Analysen, ohne theoretische Grundlage mit einem Modell für die Zustandsbeschreibung. Deshalb war ungewiss, ob man das Messverfahren auf andere Prozesse übertragen, oder damit auch nur andere Reifenfabriken mit anderen Pressen ausrüsten könnte. Also war ein vollständigeres analytisches Modell gefordert um die Parameter besser fassen zu können und den Aufwand für empirische Untersuchungen in den Fabriken zu minimieren.

Mathematisches Modell

Als Grundlage eines mathematischen Modells stehen die un stetigen Differentialgleichungen zur Beschreibung der Wärmeleitung zur Verfügung [1]. Die Lösung verwendet alle Parameter (siehe Kasten und Bild 2), die erforderlich sind, um die Kerntemperatur eines Werkstücks aus den Ergebnissen berührungsloser Messverfahren für die Oberflächentemperatur abzuleiten und führt zu einer relativ einfachen Berechnung.

- Koeffizient K_1 wird benötigt um das Infrarot-Thermometer zu programmieren. Er ist durch die Gleichung in Bild 2 definiert.
- Koeffizient K_2 , der für einen ungeklärten Anfangszustand steht, ist ebenfalls bekannt
- Die Koeffizienten wachsen mit den üblichen dimensionlosen Formeln zur Beschreibung der Wärmeübertragung: Der Fourier-Zahl (Fo) zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufs der Wärmeübertragung und der Biot-Zahl (Bi) für das Verhältnis von Wärmeleitung auf der Oberfläche zur Wärmeleitung im Innern des Objekts.

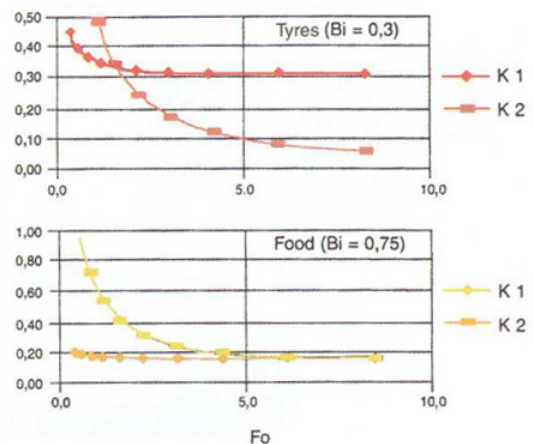


Bild 4: Für Reifen nähert sich der Wert von $K_1 (= K)$ asymptotisch dem Wert 0,31 an ($Fo = |2|$) Bei Lebensmitteln ist K_1 praktisch unabhängig von Fo .

In Bild 4 ist die Änderung von K_2 und K_1 in Abhängigkeit von Fo und Bi für die thermische Behandlung von Reifen dargestellt und zum Vergleich auch für ein Lebensmittel.

Die Ergebnisse solcher Berechnungen können zur Herleitung einer Art „Prozessbeschleunigungsgleichung“ SBE (Speed Boost Equation) genutzt werden, aus der sich ein Regelalgorithmus für den Wärmezufluss ableiten lässt. Damit lassen sich gleichmäßige Temperaturprofile von der Oberfläche zum Kern des Materials erreichen, während die Materialgeschwindigkeit v variiert. Für Änderungen bei der Prozessgeschwindigkeit von über 10 % könnte das Übertragungsverhalten von Wärme zu Material nichtlinear werden und einen Neuabgleich des Wertes $K2/K1$ erforderlich machen.

Der physikalische Hintergrund der SBE beschreibt, dass - bei gegebener Geschwindigkeit - das Verhältnis von zugeführter Energie aus der Wärmequelle mit Temperatur T_{∞} auf die Oberfläche mit Temperatur T_s geteilt durch die Differenz der Temperaturniveaus zu Beginn T_0 und am Ende des Prozesses T_s konstant gehalten werden muss. Die Anfangstemperatur des Materials und die Temperatur der Wärmequelle müssen so geregelt werden, dass die SBE stets erfüllt ist.

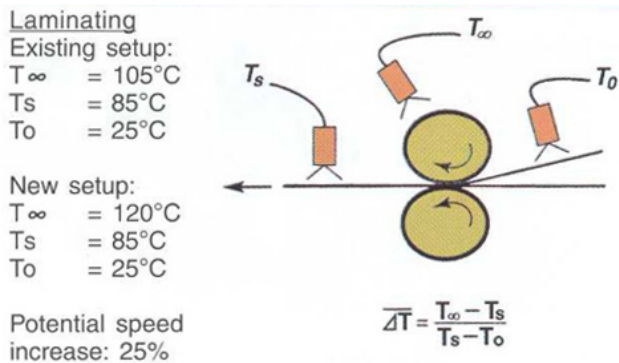


Bild 5: Beschleunigung der Prozessgeschwindigkeit beim Laminieren

Druck- und Laminiermaschinen

Wendet man die SBE auf einen Laminierprozess an – wie in Bild 5 dargestellt – lässt sich eine Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit von bis zu 25 % erreichen, indem man die Temperatur der Heizwalze von 105°C auf 120°C erhöht und alle anderen Parameter konstant hält. Derselbe Effekt lässt sich erreichen ohne die Temperatur der Heizwalze zu verändern, stattdessen aber die Materialien auf 48°C vorheizt.

In Bild 6 ist als nächstes Beispiel ein professioneller Farbkopierer skizziert. Er nutzt als Wärmequelle die Fixiereinheit. Die Produkttemperatur ist die Temperatur der Kopie selbst und die Anfangstemperatur ist die des einlaufenden Papierbogens. In Farbkopierern ändert sich die Viskosität der eingesetzten Tinten empfindlich mit der Temperatur. Hier ist eine genaue Temperaturregelung gefordert um die Qualität der Farbkopien auch bei hohen Geschwindigkeiten zu halten. Geschwindigkeit ist eins der entscheidenden Verkaufsargumente. Analysiert man solche Prozesse mit Hilfe der SBE-Parameter und nutzt entsprechende Infrarot-Sensoren, dann lässt sich die Kopiergeschwindigkeit gut optimieren – insbesondere,

wenn eine Vorwärmstufe für das Papier integriert ist.

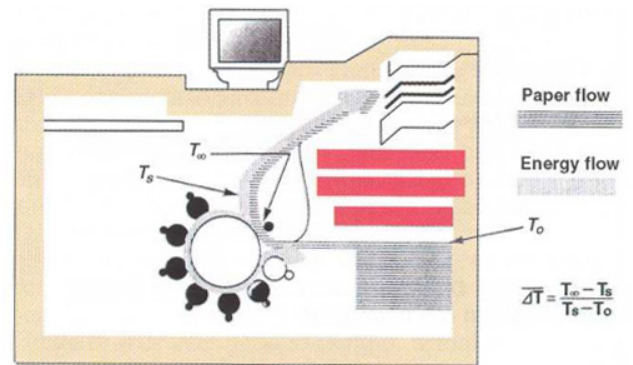


Bild 6: Beschleunigung der Prozessgeschwindigkeit bei einem Hochgeschwindigkeitskopierer. IR-Sensoren überwachen die Temperaturen am Papiereinzug, an der Fixierwalze und beim Auswurf.

In Bild 7 ist ein weiteres Beispiel aus der Grafischen Industrie skizziert. Zur kontrollierten Temperierung der Papierbahnen wird hier die Temperatur der Walzen mit zwei Infrarot-Sensoren erfasst.

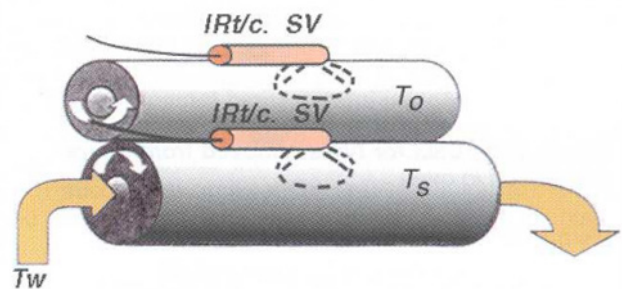


Bild 7: Hochwirksames Kühlsystem in einer Druckmaschine. Beide Walzen werden berührungslos von IRT/c-Sensoren überwacht.

Zusammenfassung

Beim Einsatz von Infrarot-Sensoren zur genauen Überwachung thermischer Prozesse - insbesondere um die Durchlaufgeschwindigkeiten zu erhöhen - ist der Zusammenhang zwischen der direkt messbaren Oberflächentemperatur und der indirekt zu erfassenden Kerntemperatur der Materialien zu beachten. Dabei lässt sich das einfache Ergebnis einer aufwändigen mathematischen Berechnung verwenden, um die Kerntemperatur zuverlässig abzuschätzen. Die wichtigsten Parameter sind Oberflächentemperatur, Umgebungstemperatur, Materialeigenschaften und Verarbeitungsgeschwindigkeit. Die Erweiterung dieser Betrachtungen führt zu einem Ergebnis, das hier als SBE („Prozessbeschleunigungsgleichung“) bezeichnet wird und zusammen mit geeigneten Infrarot-Sensoren den Produktionsprozess beschleunigen kann, ohne die thermischen Materialeigenschaften zu verändern.

ELECTRICITY + CONTROL

This is to certify that

J Pompei

of

Exergen Corporation

is the author of an article entitled

*Aspects of increased production speeds via IR control of
product internal temperature*

published in

ELECTRICITY + CONTROL

in the May issue of the year 2002

W. J. Pompei
Author

J. J. J. J.
Editor

Crown Publications

Exergen Global offices:

The Netherlands
Pastoor Clercxstraat 26
5465 RH Veghel
Tel: +31 (0)413 376 599
Fax: +31 (0)413 379 310

USA
400 Pleasant Street
Watertown, MA 02472
Tel: +1 617 649 6322
Fax: +1 617 923 9911

office@exergenglobal.com
www.exergenglobal.com

WP-505-DE-V0