

Volumenstrombestimmung an gasdurchflossenen Düsen mit Thermografie

Manoucher DOROSHTNASIR¹, Rainer KRANKENHAGEN¹,
Christiane MAIERHOFER¹, Norbert BLOCK², Philipp BINDER²

¹BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

²BLOCK Materialprüfungs-Gesellschaft mbH, Motardstr. 54, 13629 Berlin

Kurzfassung. Filmkühlung in Turbinenschaufeln wird über Öffnungen realisiert, die sich über die ganze Oberfläche erstrecken. Ein Verschluss einzelner Öffnungen während des Einsatzes kann zum Ausfall der Schaufeln führen. Daher findet in der Regel eine gründliche Qualitätskontrolle vor der Auslieferung statt. Eine moderne Variante ist die so genannte thermografische Transmissionsmessung, mit der verschlossene Öffnungen zuverlässig aufgefunden werden können. Während der Messung wird heiße Luft durch die Turbinenschaufel geleitet und die Löcher werden mit einer Thermografiekamera betrachtet. Ein grundsätzliches Problem bei dieser Messung sind teilweise verschlossene Öffnungen, die zu nichteindeutigen Anzeigen führen. Ein Teilverschluss ist nur innerhalb der ersten Sekunden im Thermogramm erkennbar, wenn sich Erwärmungen von Nachbaröffnungen und dem Hintergrund noch nicht überlagert haben. Hier wird gezeigt, dass durch die Überdeckung der Löcher mit Gewebe die verschiedenen Effekte der Erwärmung voneinander entkoppelt werden können. Die FuE-Arbeiten wurden im Rahmen des BMWi-Förderprogramms ZIM unter dem Titel „VOLGAST – Volumenstrombestimmung an Gasdüsen mittels Thermografie im industriellen Umfeld“ als KF-Projekt bezuschusst. Die Patentanmeldung ist erfolgt.

1. Einleitung

Gasturbinenschaufeln sind sehr hohen thermischen Belastungen ausgesetzt. In neuen Turbinen übersteigen die Temperaturen die 1600°C - Grenze. Um die erforderliche Temperaturfestigkeit zu erreichen, werden die Schaufeln als Hohlkörper mit zahlreichen Öffnungen gefertigt. Durch diese Öffnungen wird im Betrieb kalte Luft gespült, so dass sich ein Kühlfilm auf der Oberfläche der Turbinenschaufel bildet. Der Zustand der Löcher ist entscheidend für die Lebensdauer der Turbinenschaufel und wird entsprechend gründlich untersucht. Eine Offenlegungsschrift von General Electric beschreibt ein Verfahren und einen Aufbau, wie eine solche Untersuchung mit aktiver Thermografie durchgeführt werden kann [1]. Diese Untersuchungsmethode hat inzwischen weite Verbreitung gefunden. Gemäß der beschriebenen Methode wird die Schaufel mit erhitzter Luft durchspült, während sie mit einer Thermografiekamera betrachtet wird. Die heiße Luft erwärmt dabei die Mantelfläche der durchströmten Öffnungen und bildet dadurch eine Temperaturverteilung aus, welche als thermische Signatur an der Schaufeloberfläche im Thermogramm erkennbar wird. Abbildung 1 zeigt den Aufbau aus dem Patent DE 3533186 von 1986 [1].

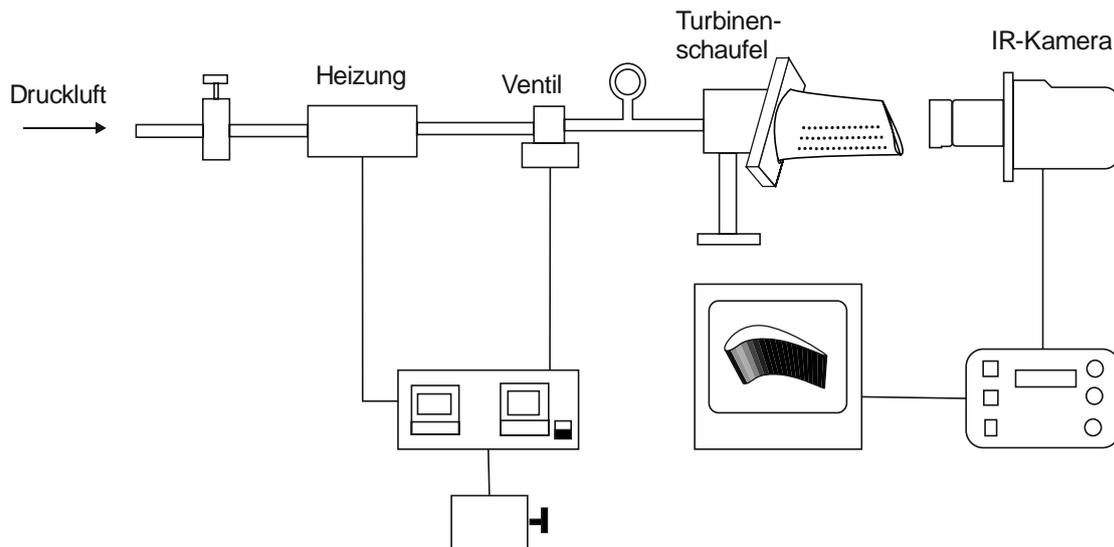


Abbildung 1 Zeichnung nach Patent DE 3533186 [1]: Apparat zur Heißluftanregung und Thermografischen Untersuchung einer Turbinenschaufel

Die Erwärmung erlaubt auch eine Aussage über die Durchströmung: je größer der Temperaturanstieg, desto größer die Luftmenge, die durch die jeweilige Öffnung hindurch strömt. Eine Ja/Nein Aussage bezüglich der Durchlässigkeit ist mit diesem Messprinzip problemlos möglich. Entsprechende Messaufbauten sind mittlerweile kommerziell erhältlich, z.B. von TWI aus Michigan [2] oder von Thermosensorik aus Erlangen [3]. Die Gewinnung von Aussagen über einen Teilverschluss der Löcher steht jedoch noch aus.

2. Messplatz

Der Messplatz, der im Rahmen des Projektes VOLGAST aufgebaut wurde, stellt Heißluft druck- oder massenfluss geregelt mit einer Genauigkeit von 0,2 mbar bzw. 0,3 % vom Messwert im Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 250 °C zur Verfügung. Zum Zeitpunkt $t = 0$ wird die Turbinenschaufel mit einem konstanten Volumenfluss mit nahezu konstanter Gastemperatur erwärmt. Abbildung 2 zeigt die jeweilige Sprungantwort des Massenflusses und der Temperatur der Luft vor Eintritt in die Turbinenschaufel. Der Volumenfluss kommt relativ schnell zustande und wird in Abbildung 2 als ideal stufenförmig betrachtet. Im Gegensatz dazu verhält sich der Temperaturanstieg in der Kammer vor der Schaufel langsamer.

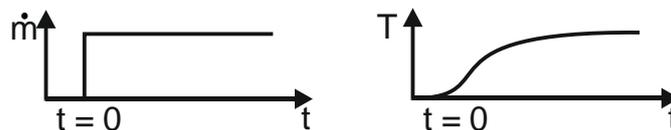


Abbildung 2 Sprungantwort von Massenfluss und Temperatur in der Vorkammer

Der im Projekt entwickelte Messaufbau ist in Abbildung 3 gezeigt. Die Druckluft wird über ein Regelventil mit einer Reaktionszeit von 50ms zur Verfügung gestellt. Die Luft wird über einen Heizschlauch über eine Strecke von 3 m geheizt. Abhängig von der Geschwindigkeit, mit der die Luft durch den Heizschlauch strömt, wird am Ausgang eine Temperatur von bis zu 250°C erreicht. In den nachfolgend beschriebenen Versuchen hatte die Luft nach etwa 2s eine Temperatur von 180°C.

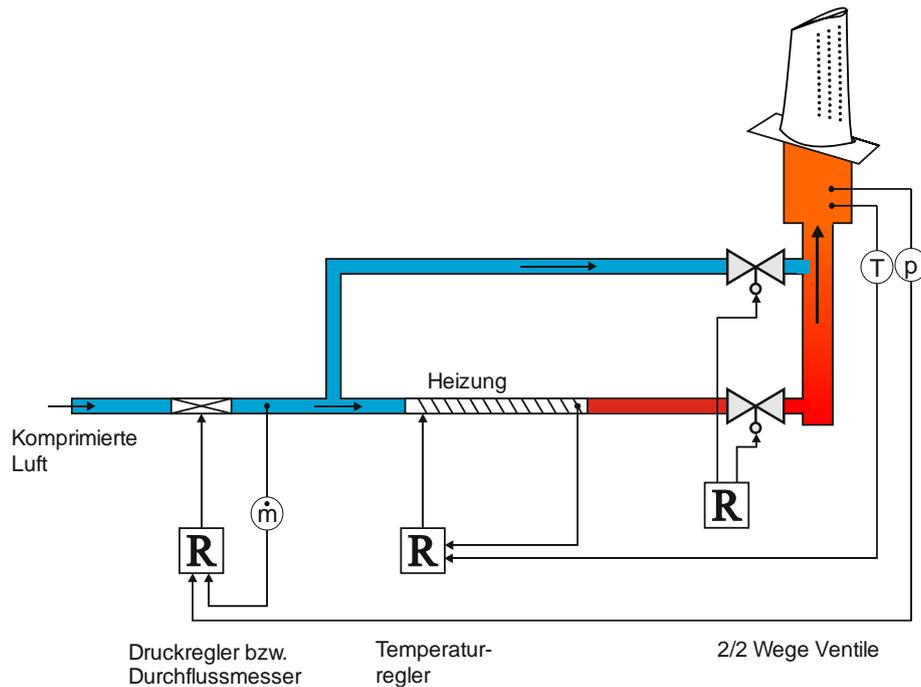


Abbildung 3 Aufbau zur Heißluftanregung einer Gasturbinenschaufel

Der Temperaturverlauf war reproduzierbar und trotz der Einschwingzeit für das vorgestellte Verfahren geeignet. Ein äquivalenter Aufbau für den industriellen Einsatz wurde bei der Block GmbH aufgebaut. Dieser kann eine deutlich größere beheizte Luftmenge zur Verfügung stellen und damit Turbinenschaufeln komplett mit beheizter Luft durchspülen.

3. Überprüfung des Standes der Technik

Der Versuchsstand erlaubt eine Anregung gemäß dem oben beschriebenen Patent. Um dies zu zeigen wurde eine Turbinenschaufel mit einem Druck von 0,5 bar beaufschlagt. Der an den Öffnungen anliegende Differenzdruck hat einen Volumenstrom zur Folge, der abhängig vom Querschnitt ist. Die heiße Luft sollte somit, je nach Menge und Temperatur der Luft, einen Temperaturhub erzeugen. Die folgende Abbildung 4 zeigt das Thermogramm nach 2s Durchspülung. Erst nach diesen 2s werden die Nebeneffekte (thermisches Übersprechen des Hintergrunds und der Nachbarlöcher) wirksam. Bis zu diesem Zeitpunkt tritt an den einzelnen Öffnungen ein Temperaturanstieg von maximal 15K auf.

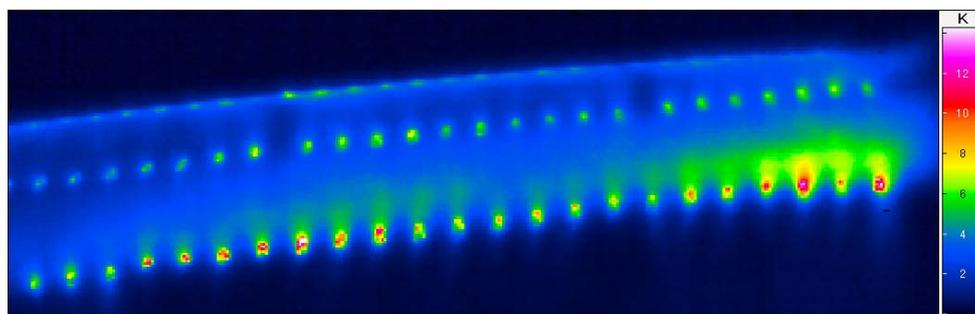


Abbildung 4 Thermogramm nach 2s Erwärmung der Turbinenschaufel mit heißer Luft ($T=180^{\circ}\text{C}$, $\Delta p=0,5\text{bar}$)

Die Separation der einzelnen Öffnungen ist möglich, jedoch sind die Signale zu gering und zu instabil für eine quantitative Analyse. Es liegt auf der Hand, dass eine längere Anregungszeit einen höheren Temperaturhub hervorruft. Jedoch verändert sich mit der Zeit die thermische Signatur und es erscheinen, neben den eigentlichen Löchern, weitere Substrukturen, wie die folgende Abbildung 5 zeigt.

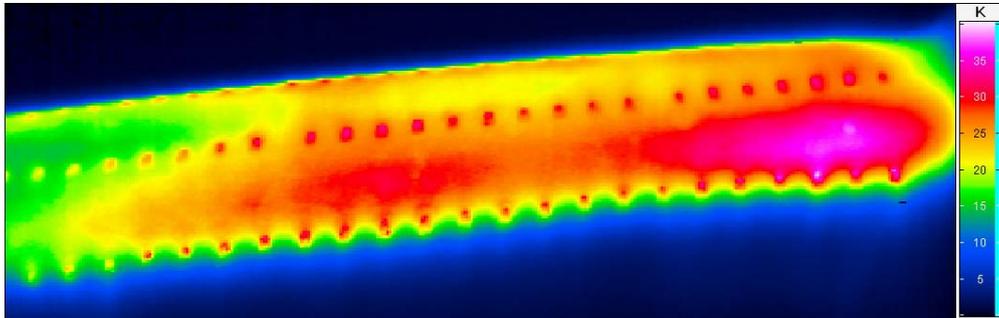


Abbildung 5 Thermogramm nach 30s Erwärmung mit heißer Luft ($T=180^{\circ}\text{C}$, $\Delta p=0,5\text{bar}$)

Der erwartete deutliche Temperaturanstieg ist messbar, jedoch treten seitliche Beeinflussungen sowie Rückwandeffekte auf, so dass eine quantitative Analyse einzelner Bohrungen nicht mehr möglich ist.

4. Thermische Störeinflüsse

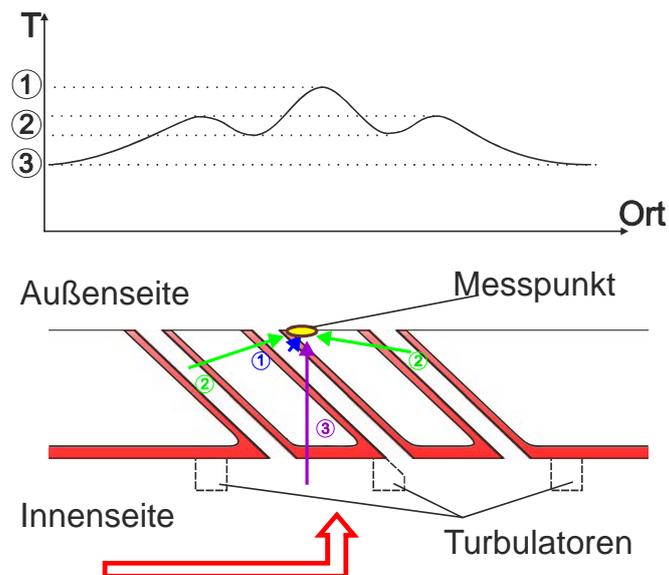


Abbildung 6 Schematische Darstellung der Einflüsse, die während einer Messung beobachtet werden

Beim Durchfluss der heißen Luft durch die Kanäle treten drei Effekte parallel auf. Die Erwärmung

1. der Innenwand der einzelnen Öffnungen
2. durch die Nachbaröffnungen und
3. von der Rückseite (hier als konst. Offset angenommen).

Abbildung 6 zeigt schematisch die Beiträge der oben aufgeführten Effekte zur Erwärmung am markierten Messpunkt. Die Strömung an der Rückseite wird hier vereinfacht als laminare Strömung dargestellt. Tatsächlich befinden sich Turbulatoren in Form von Stegen und Aussparungen an der Innenseite der Turbinenschaufel, um Verwirbelungen zu erzeugen. Diese bewirken während des Betriebs eine größere Kühlwirkung der durchströmenden Luft, aber auch eine inhomogene Erwärmung bei dieser Messung.

Alle drei Effekte werden am Messpunkt zu verschiedenen Zeitpunkten sichtbar. Die Öffnungen sind gleich zu Beginn einer Messung erkennbar. Die Erwärmung von der Rückseite und die der Nachbarlöcher werden an der eigentlichen Öffnung erst Sekunden nach Beginn der Anregung messbar.

5. Die Idee

Wenn ein Gewebe über die Bohrungen aufgebracht wird, lassen sich die störenden Effekte (Punkt 2 und 3) wirkungsvoll unterdrücken. Es wird dann die Temperatur des Gewebes direkt über der Bohrung und nicht die der Oberfläche der Turbinenschaufel gemessen. Das Gewebe ist, im Gegensatz zur Turbinenschaufel, thermisch weniger träge und erwärmt sich demnach um ein Vielfaches schneller. Abbildung 7 zeigt schematisch den Aufbau und die Auswirkung im Thermogramm, nachdem ein Gewebe auf die Oberfläche der Turbinenschaufel aufgebracht wurde. Idealerweise würde zwischen dem Gewebe und der Schaufeloberfläche ein dünner Luftspalt verbleiben, der die direkte Wärmeleitung zwischen beiden Materialien unterbindet.

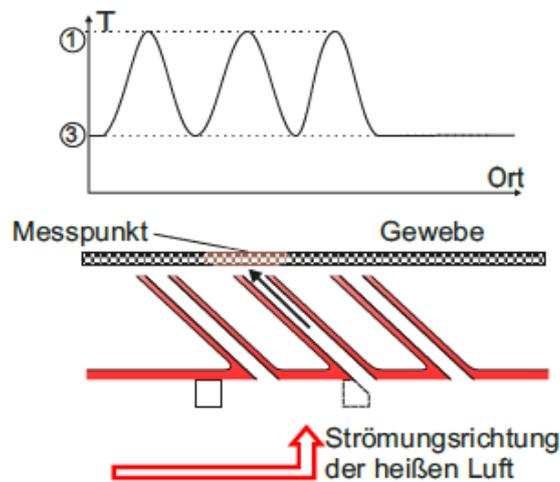


Abbildung 7 Theorie der Wärmeleitung an einer Turbinenschaufel, nachdem ein Gewebe aufgebracht wurde.

6. Messergebnisse mit Gewebeüberzug

Der Gewebeüberzug zeigt eine deutliche Verbesserung des Signal zu Rauschverhältnisses im Vergleich zur vorherigen Messung. Der Temperaturhub beläuft sich auf bis zu 37 K nach 2s Erwärmung während die Nebeneffekte durch den Hintergrund und der Nachbarlöcher unterdrückt werden. Abbildung 9 zeigt ein entsprechendes Thermogramm, im Vergleich dazu zeigt Abbildung 8 bei gleicher Skalierung das Thermogramm ohne Gewebeüberzug.



Abbildung 8 Thermogramm nach 2s Erwärmung mit heißer Luft ($T=180^{\circ}\text{C}$, $\Delta p=0,5\text{bar}$)

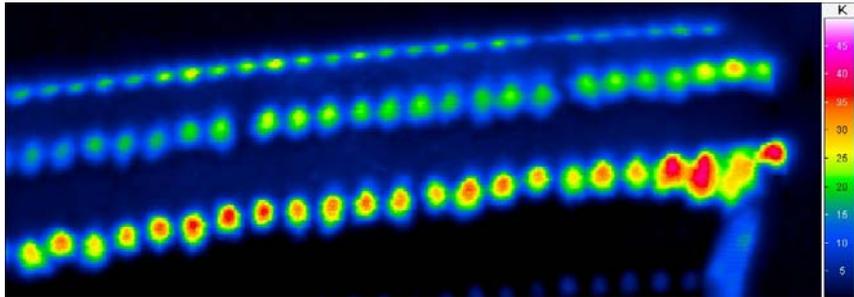


Abbildung 9 Thermogramm einer Turbinenschaufel mit Gewebeüberzug nach 2s Erwärmung ($T=180^{\circ}\text{C}$, $\Delta p=0,5\text{bar}$)

Nach längerer Anregungszeit ist keine weitere Verbesserung der Signalqualität zu erkennen, aber die Rückwandeffekte werden weiterhin wirkungsvoll unterdrückt und die thermische Kontur der einzelnen Öffnungen bleibt stabil, wie Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen. Jedoch haben verschiedene Gewebearten auch unterschiedliche Aufweitungen der thermischen Signatur zur Folge oder können die Signatur sogar gänzlich verfälschen. Dünne Gewebe lassen die Turbinenschaufel teilweise durchscheinen, damit findet nur eine schwache Unterdrückung der störenden Nebeneffekte statt. Dicke Gewebe hingegen rufen große Ausweitungen der Löchersignatur im Thermogramm hervor.

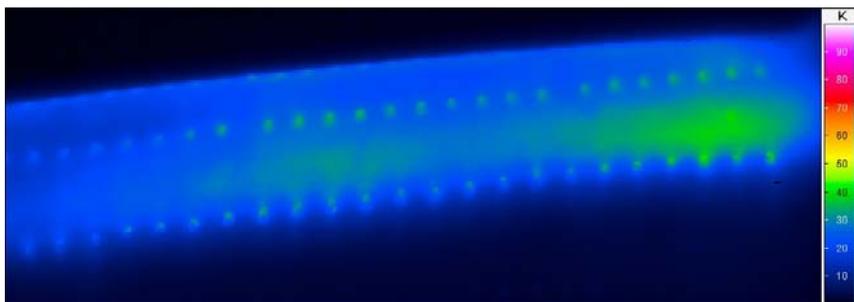


Abbildung 10 Thermogramm mit Gewebeüberzug nach 2s Erwärmung mit heißer Luft ($T=180^{\circ}\text{C}$, $\Delta p=0,5\text{bar}$)

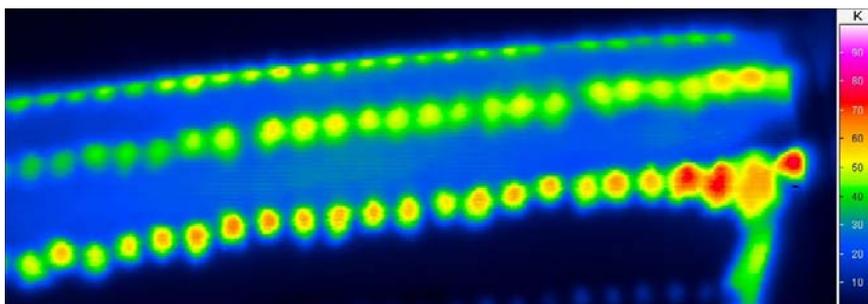


Abbildung 11 Thermogramm einer Turbinenschaufel mit Gewebeüberzug nach 30s Erwärmung ($T=180^{\circ}\text{C}$, $\Delta p=0,5\text{bar}$)

7. Zusammenfassung & Ausblick

Eine thermografische Bestimmung des quantitativen Gasdurchflusses an einer Kühllöffnung ist auf Grund von Störeffekten nicht ohne weiteres möglich. Eine Volumenstrombestimmung ist nur innerhalb der ersten zwei Sekunden möglich, da nur dann eine volumenstromabhängige Erwärmung erfolgt. Jedoch ist die Temperaturerhöhung nicht hoch genug für eine verlässliche Aussage. Der Einsatz eines Gewebes führt zu einer Erhöhung der Temperaturdifferenzen und zur Unterdrückung der Störeffekte. Versuche

haben gezeigt, dass das Signal zu Rauschverhältnis um mehr als das Doppelte verbessert wird.

Für eine Volumenstrombestimmung muss das Gewebe optimiert werden, so dass es zum Einen undurchsichtig ist und zum Anderen eine maximale Gasdurchlässigkeit besitzt.

8. Quellenverzeichnis

- [1] D. C. Thomas E. Bantel, „Verfahren zur Kühllochprüfung“. Patent DE 3533186 A1, 1986.
- [2] TWI ts3, <http://www.thermalwave.com/t3s.htm>, 09.10.12
- [3] Thermosensorik ThermoSpectorGTC, <http://www.thermosensorik.de/branchenloesungen.html>, 09.10.12
- [4] R. S. Bunker, „System and method for thermal inspection of parts“. Patent US 7,651,261 B2, 2010.
- [5] R. S. Bunker, „Method and Apparatus for non-destructive thermal inspection“. Patent US 6,804,622 B6, 2004.
- [6] R. S. Bunker, „Thermal inspection system and method“. Patent US 7,909,507 B2, 2008.