

Einzelblitz vs. Multiblitz – Blitzthermografie mit mehreren Blitzen

Rainer KRANKENHAGEN, Christiane MAIERHOFER
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Kurzfassung: Die Blitzthermografie weist eine Reihe von Vorteilen gegenüber anderen Verfahren der aktiven Thermografie auf und hat daher eine relativ große Verbreitung in Forschung und Industrie gefunden. Ein wesentlicher Nachteil ist jedoch die begrenzte Energie, die pro Blitz genutzt werden kann. Es stellt sich die Frage, ob sich durch mehrere kurz hintereinander ausgeführte Blitze eine Verbesserung des Energieeintrags erreichen lässt. Zur experimentellen Untersuchung dieser Frage wurde ein Versuchsstand mit vier Blitzlampen so umgerüstet, dass die Blitzlampen zeitgleich oder nacheinander mit einer regelbaren Verzögerung ausgelöst werden können („Multiblitz“). Als Probekörper dienten Platten aus CFK, an deren Rückseite Flachbodenbohrungen (FBB) eingebracht worden waren. Betrachtet wurde jedoch nur der absolute Temperaturhub am ungestörten Material. Die Experimente zeigen relativ geringe Effekte im Prozentbereich, wie sie auch gemäß einer quantitativen Abschätzung zu erwarten sind. Interessanterweise vergrößerte sich der Einfluss der Multiblitzanregung auf die Energieeinkopplung deutlich bei einem etwas vergrößerten Abstand zwischen Blitzlampen und untersuchter Oberfläche. Die Ursache für diesen Effekt ist derzeit unklar, vermutet werden eine Temperaturabhängigkeit und/oder eine Abstandsabhängigkeit des Wärmübergangskoeffizienten im Konvektionsterm.

Einführung

Die Blitzthermografie weist eine Reihe von Vorteilen gegenüber anderen Verfahren der aktiven Thermografie auf und hat daher zumindest im Laborbereich schon eine relativ große Verbreitung gefunden. Ein wesentlicher Nachteil ist jedoch die begrenzte Energie, die pro Einzelblitz zur Verfügung gestellt werden kann. Insbesondere bei dickeren Proben reicht der Energieeintrag nicht aus, um auch tiefer gelegene Inhomogenitäten im Material thermisch nachzuweisen. Durch den gleichzeitigen Einsatz mehrerer Blitzlampen lässt sich die flächenbezogene Energiedichte an der Oberfläche des Untersuchungsobjektes deutlich steigern. Dabei können jedoch sehr hohe Oberflächentemperaturen entstehen. Es stellt sich die prinzipielle Frage, ob solche kurzzeitigen Temperaturspitzen die Einkoppeleffizienz gegenüber der einfallenden Strahlungsenergie, z.B. aufgrund stärkerer Verluste an die Umgebung, negativ beeinflussen und ob eine Verbesserung mit einem zeitlichen Versatz der Einzelblitze erreicht werden kann.

Bereits 2003 wurde gezeigt, dass zwei Blitze, gezündet im Abstand von 3 ms, zu höheren Kontrasten an rückseitigen Flachboden-Bohrungen führen als bei exakt gleichzeitiger Auslösung [1]. Der Effekt war an verschiedenen Materialien unterschiedlich stark ausgeprägt und lag im Bereich weniger Prozente. Später wurde dann als Ursache für diesen Effekt die Veränderung des entsprechenden Fourier-Spektrums eines Doppelblitzes ange-

führt, die zu einer Verbesserung des Signal-zu-Rausch Verhältnisses führen soll [2]. Ebenfalls 2003 wurde die sequentielle Anwendung von mehreren Blitzen unter dem Namen „Multi-Puls-Thermografie“ vorgestellt [3]. Die Autoren konnten am Beispiel von CFK-Platten zeigen, dass der höhere Energieeintrag infolge mehrerer Blitze zu höheren thermischen Kontrasten an den Fehlstellen führt. Bei exakt gleichem Energieeintrag konnte hingegen kein Unterschied zwischen Einzelblitz und Blitzfolge gezeigt werden. Yang et. al. untersuchten in ihrer Arbeit [4] den Unterschied zwischen Einzelpuls und einer Sequenz von vier Einzelblitzen bei gleicher Gesamtenergie, allerdings nur theoretisch mit Hilfe von Simulationen. Sie stellten keine erhöhte Energieeinkopplung fest, wohl aber eine deutliche Reduzierung der maximalen Oberflächentemperatur

Da thermografische Untersuchungen oft mit bis zu vier und mehr Blitzlampen gleichzeitig durchgeführt werden, stellt sich natürlich die Frage nach der optimalen Ausnutzung der vorhandenen Kapazitäten. Deshalb wurden vergleichende Untersuchungen mit einzelnen und mehreren aufeinander folgenden Blitzen durchgeführt.

1. Theoretische Vorbetrachtungen

Für eine quantitative Betrachtung der Blitzthermografie ist es notwendig, den Energiestrom an der Oberfläche des zu erwärmenden Körpers zu betrachten. Abb. 1 skizziert die Situation unmittelbar nach der impulsartigen Bestrahlung, die zu einer starken Erwärmung einer oberflächennahen Schicht (rote Schicht) geführt hat.

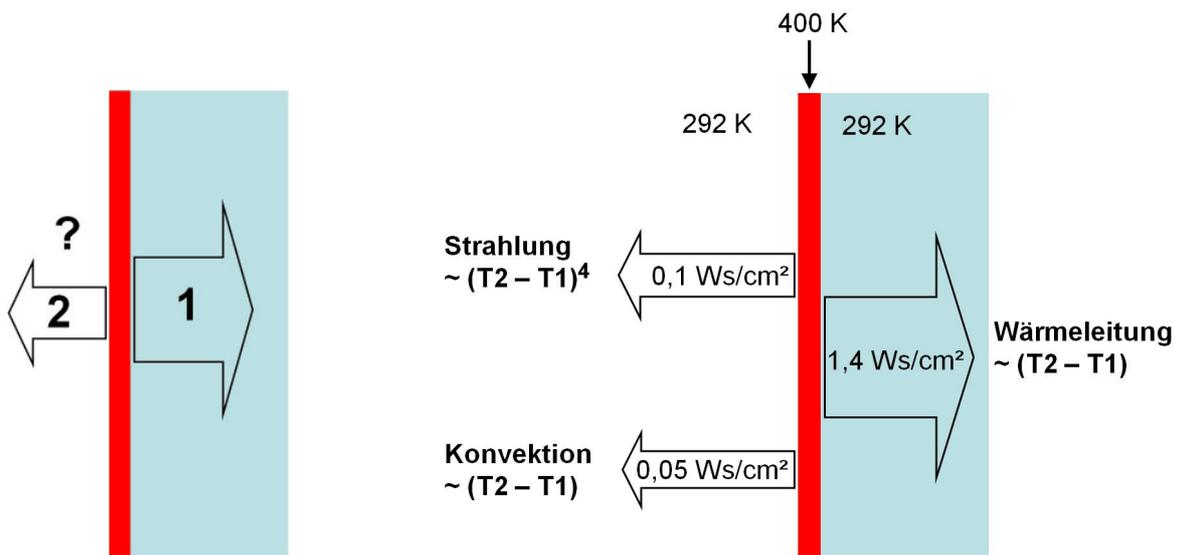


Abb. 1: Prinzipskizze zur Betrachtung der Energieströme an einer erwärmten Oberfläche (roter Bereich) eines Festkörpers (grüner Bereich). Beitrag 1 ist der Energieeintrag ins Volumen, Beitrag 2 umfasst alle Verluste.

Abb. 2: Bilanzbetrachtung der Energieströme an einer erwärmten Oberfläche (roter Bereich mit 400 K gegenüber 292 K im grünen Bereich), gerechnet mit einem Wärmeleitkoeffizienten von $8 \text{ mW}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ und einem Wärmeübergangskoeffizienten an ruhender Luft von $0,5 \text{ mW}/\text{cm}^2$.

Der entstandene Temperaturgradient führt zu einem Wärmestrom ins Körperinnere (Anteil 1). Die aktive Thermografie beruht auf der Nutzung dieses Wärmestroms, der beim Vorhandensein von thermischen Inhomogenitäten zu thermischen Kontrasten an der Körperoberfläche führt. Daneben gibt es Energieverluste an der Oberfläche auf Grund von Abstrahlung und Konvektion (Anteil 2). Die Effizienz der Energieeinkopplung μ_{Kop} ist daher gleich:

$$\mu_{Kop.} = \frac{\text{Anteil 1}}{(\text{Anteil 1} + \text{Anteil 2})}$$

Gl. 1

In Abb. 2 ist beispielsweise eine Abschätzung der jeweiligen Prozesse für den Fall einer auf 400 K erwärmten Oberfläche eines GFK (glasfaserverstärkter Kunststoff)-Körpers dargestellt. Dabei wurden die relevanten Prozesse Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion adiabatisch innerhalb einer Zeitspanne von 1 s als konstant angenommen. Für den gezeigten Fall ergibt sich $\mu_{Kop.}$ mit etwa 90%.

Bei der Blitzthermografie tritt in der Regel eine starke Erwärmung der Oberfläche auf. Die dabei auftretenden Energieverluste sind ein reiner Oberflächeneffekt und können daher nicht für die zerstörungsfreie Prüfung des Volumens genutzt werden. Wegen der starken Nichtlinearität des Strahlungsterms ist eine weitere Verschlechterung der thermischen Einkopplung bei höheren Oberflächentemperaturen zu erwarten. Abb. 3 zeigt die errechnete Temperaturabhängigkeiten für GFK und für Edelstahl, letzteres als Beispiel für einen vergleichsweise guten Wärmeleiter.

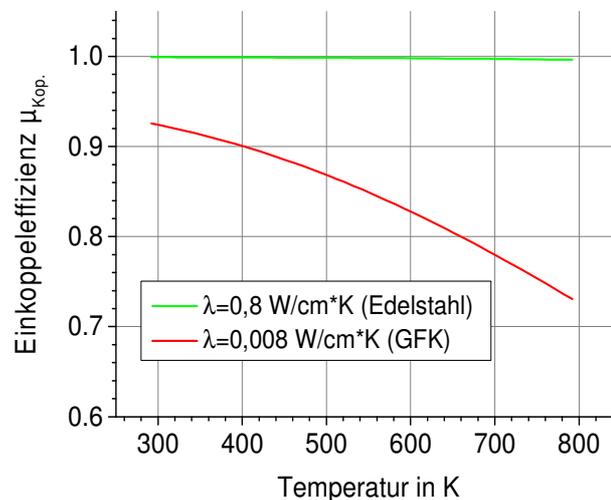


Abb. 3: Berechnete Temperaturabhängigkeit der Einkoppeffizienz einer erwärmten Oberfläche ins Volumen für zwei verschiedene Wärmeleitfähigkeiten.

Es wird deutlich, dass die Temperaturabhängigkeit der einkoppelbaren Energie nur bei schlechten Wärmeleitern zu relevanten Effekten führen kann. Bei guten Wärmeleitern ist die ins Innere abgeleitete Wärmeenergie sehr viel größer als die Energieverluste an der Oberfläche.

Gerade bei thermisch langsamen Materialien, d.h. die Temperaturleitfähigkeit ist vergleichsweise gering und die Wärme fließt während der Erwärmungsphase kaum ins Körperinnere ab, können jedoch sehr hohe Oberflächentemperaturen bei hohen Leistungsdichten auftreten, wie z.B. bei der Laserspot-Anregung oder bei Verwendung von Blitzlampen auf geringe Entfernungen. Um diese hohen Oberflächentemperaturen zu vermeiden und damit die Effizienz der Erwärmung zu erhöhen, könnte es sinnvoll sein, die Erwärmungsphase zeitlich zu strecken. Bei einer herkömmlichen Blitzlampe lassen sich Pulsform und -dauer kaum beeinflussen. Bei der Nutzung von vier separaten Blitzlampen kann man hingegen über die zeitliche Abfolge ein Art Pulsformung realisieren. Da bei den Versuchen keine erkennbare Schädigung der Oberfläche an CFK-Platten auftrat, können die bei Blitzthermografie auftretenden maximalen Oberflächentemperaturen nicht oberhalb von 800 K liegen. Die tatsächliche Maximaltemperatur ist jedoch unbekannt, deshalb wurde durch Experimente untersucht, ob ein messbarer Effekt auftritt.

2. Experimenteller Aufbau

2.1 Probekörper

Als Probekörper für die Messungen wurde eine CFK (kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff)-Platte der Abmaße $200 \times 200 \times 6 \text{ mm}^3$ mit rückseitigen Flachbodenbohrungen (FBB) eingesetzt. Die CFK-Platte wurde aus 30 Lagen Gewebe mit 160 g/m^2 mit 0/90 Faserorientierung und Epoxydharz gefertigt. An der Rückseite befindet sich eine Anordnung verschiedener Flachbodenbohrungen (FBB) mit den Durchmessern 4 mm, 8 mm, 16 mm und 24 mm mit jeweils verschiedenen Restwandstärken (0,5 mm bis 4 mm). In Abb. 4 ist der Probekörper in der Mitte des Aufbaus zu erkennen.

2.2 Messaufbau

Als Anregungsquellen wurden vier Blitzlampen EH Pro 6000 der Firma Hensel mit den entsprechenden Netzgeräten TRIA 6000 S mit 6 kJ Energieaufnahme pro Blitz eingesetzt. Die Steuersignale zur Erzeugung der zeitlichen Abfolge der Einzelblitze wurden mit der programmierbaren IO-Unit USB 6251 unter Labview generiert. Jede Pulsfolge bestand aus vier Einzelblitzen in konstantem zeitlichen Abstand, der jeweilige Abstand bei den verschiedenen Pulsfolgen wurde entsprechend variiert (0 ms, 30 ms, 100 ms und 300 ms).

Für die Messung der Oberflächentemperaturen wurde eine IR-Kamera mit 640 x 512 Pixel Auflösung, 200 Hz Bildwiederholrate und einem spektralen Empfindlichkeitsbereich von 2 bis $5 \mu\text{m}$ verwendet. Die Kamera verfügt über ein Trigger-Interface und wurde extern durch die IO-Unit getriggert. Das bedeutet, dass die IO-Unit als Master für Kamera und Blitzlampen diente und somit die Synchronisation sicherstellte.

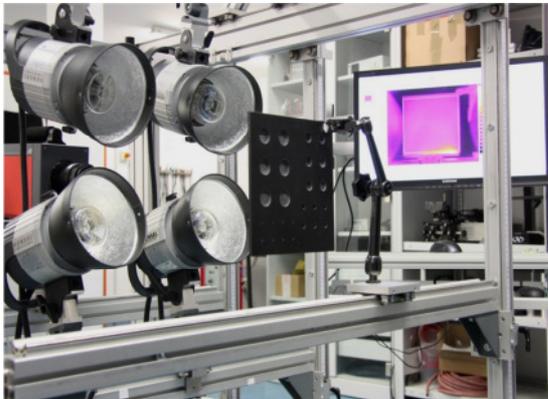


Abb. 4: Messaufbau bestehend aus vier Blitzlampen, der IR-Kamera zwischen den Blitzlampen und der CFK-Platte mit rückseitigen Flachbodenbohrungen in der Bildmitte.

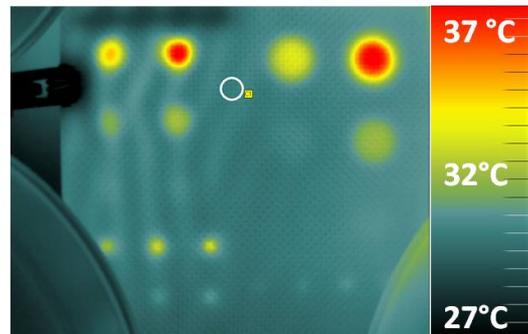


Abb. 5: Thermogramm der CFK-Platte 9 s nach gleichzeitiger Blitzanregung mit vier Blitzen in ca. 30 cm Abstand, der weiße Kreis zeigt den vermessenen Probenausschnitt in einem Bereich ohne FBB.

Abb. 4 zeigt den Messaufbau. Im Vordergrund ist der plattenförmige CFK-Probekörper mit den rückseitigen Flachbodenbohrungen zu erkennen. Links davon befinden sich die vier Blitzlampen. Hinter den Blitzlampen ist die Kamera so positioniert, dass die optische Achse mittig zwischen den vier Lampen hindurch verläuft. Der Abstand zwischen den Blitzlampen und dem Probekörper wurde zwischen 30 cm und 60 cm variiert, in Abb. 4 ist der kurze Abstand gezeigt. Durch die Vergrößerung des Abstands verringerte sich die mittlere Energiedichte in der Ebene des Probekörpers von ca. 3 Ws/cm^2 auf

1 Ws/cm². Die Bestimmung der Energiedichte in verschiedenen Abständen erfolgte mit einem Metallplättchen in einem separaten Aufbau [5].

3. Ergebnisse

3.1 Messung in geringem Abstand (30 cm)

Abb. 5 zeigt das Thermogramm des Probekörpers 9 s nach dem Ende der Blitzanregung (4 Blitze gleichzeitig) Die durch die rückseitigen FBB bedingten thermischen Kontraste sind deutlich erkennbar. Da es bei diesen Untersuchungen zunächst nur um die Energieeinkopplung in das Material ohne innere Fehler ging, wurde nur der mit dem weißen Kreis markierte Probenausschnitt betrachtet, der etwa mittig zwischen verschiedenen FBB lokalisiert ist. Abb. 6 zeigt die thermografisch gemessene Temperaturentwicklung in dieser Region für die oben beschriebenen vier verschiedenen Pulsfolgen bezogen auf die Anfangstemperatur vor der Anregung. Es ist zu beachten, dass die gemessenen Temperaturen während und unmittelbar nach den Blitzen durch Reflexionen von den Blitzlampen beeinflusst werden. Bei den folgenden Auswertungen wurden daher nur Temperaturdifferenzen im Langzeitbereich > 5 s betrachtet.

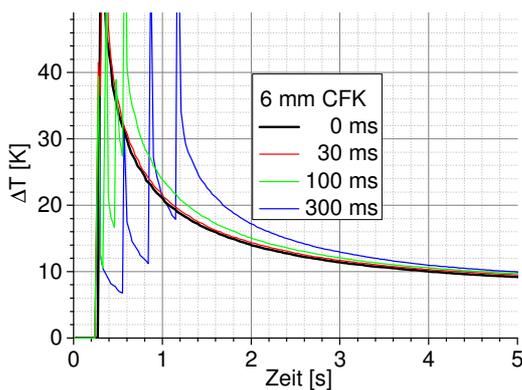


Abb. 6: Zeitliche Entwicklung der Oberflächentemperatur (als Differenz zur Ausgangstemperatur) bei vier Blitzfolgen von je vier Einzelblitzen in konstantem Abstand, 0 ms entspricht der simultanen Auslösung, der zeitliche Abstand wurde dann in 3 Schritten variiert.

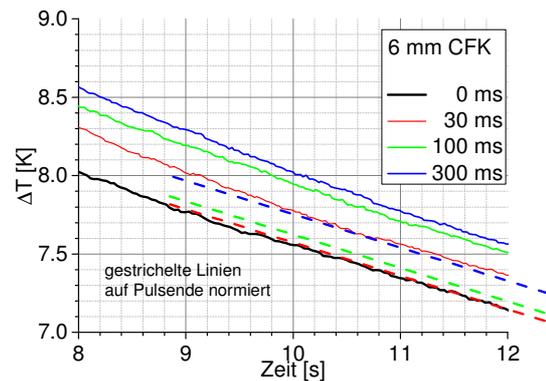


Abb. 7: Gleiche Messung wie bei Abb. 6 im Zeitbereich zwischen 8 und 12 s nach dem letzten Blitz, die durchgezogenen Linien sind die reinen Messdaten, die gestrichelten Linien entsprechen zeitlich verschobenen Messkurven in Bezug auf das Ende der Pulsfolge.

Der in den Vorbetrachtungen diskutierte Effekt sollte sich im Langzeitbereich durch veränderte Oberflächentemperaturen in Abhängigkeit vom jeweiligen zeitlichen Abstand der Einzelblitze äußern. Abb. 7 nutzt den gleichen Datensatz wie Abb. 6, aber mit deutlich höherer Temporauflösung im Langzeitbereich zwischen 8 und 12 s. Da der letzte Blitz bei der Sequenz mit 300 ms Abstand erst 0,9 s nach Beginn der Pulsfolge ausgelöst wurde, stellt sich die Frage nach der direkten Vergleichbarkeit der Daten. Wählt man den Beginn der Anregungssequenz als Bezugspunkt, kann man die Daten direkt verwenden, da die Auslösung des ersten Blitzes stets 0,3 s nach Start der Messung erfolgte. Wählt man das Ende der jeweiligen Sequenz, müssen die Kurven auf der Zeitachse so verschoben werden, dass der Zeitpunkt des jeweils letzten Blitzes bei 0,3 s liegt. Dann verringern sich die Differenzen deutlich und es entstehen die gestrichelten Kurven in Abb. 7. Die folgende Tabelle 1 zeigt noch einmal die zum gleichen Zeitpunkt gemessenen Temperaturdifferenzen im direkten Vergleich.

Tabelle 1: Gemessener Temperaturhub ΔT 10 s nach Pulsbeginn und 10 s nach Pulsende und die relative Erhöhung im Vergleich zum gleichzeitigen Auslösen aller Blitze (0 ms) bei einem geometrischen Abstand der Blitzlampen zum Prüfobjekt von 30 cm.

Bezogen auf Pulsbeginn	0 ms (Referenz)	30 ms Abstand	100 ms Abstand	300 ms Abstand
ΔT in K (10 s)	7,56	7,78	7,94	8,24
Relative Erhöhung	-	2,9 %	5,0%	9,0%
Bezogen auf Pulsende				
ΔT in K (10 s)	7,56	7,56	7,63	7,75
Relative Erhöhung	-	-	< ~ 1%	2,5%

3.2 Messung in größerem Abstand (60 cm)

Da gemäß Vorbetrachtung ein Effekt erst bei sehr hohen Oberflächentemperaturen zu erwarten war, wurden Messungen aus größerem Abstand nur deshalb durchgeführt, um den Energieeintrag räumlich zu homogenisieren. Überraschenderweise vergrößerte sich jedoch der erzielte Energieeintrag in dieser Konfiguration, wie die folgende Abb. 8 zeigt.

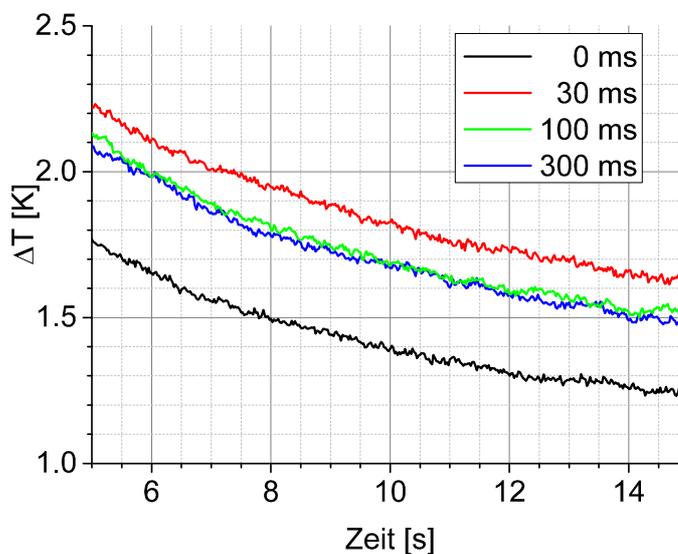


Abb. 8: Zeitlicher Verlauf des Abkühlens im Zeitbereich von 6 – 14 s nach dem letzten Blitz, es sind nur die zeitkorrigierten Kurven dargestellt. Der geometrische Abstand der Blitzlampen zum Prüfobjekt betrug 60 cm.

Im Vergleich zu Abb. 6 sind die erreichten Temperaturen deutlich niedriger, der Einfluss des zeitlichen Abstands der Blitze ist jedoch stärker ausgeprägt. Die folgende Tabelle 2 macht dies deutlich.

Tabelle 2: Gemessener Temperaturhub ΔT 10 s nach Pulsende und die relative Erhöhung im Vergleich zum gleichzeitigen Auslösen aller Blitze (0 ms) bei einem geometrischen Abstand der Blitzlampen zum Prüfobjekt von 60 cm

Bezogen auf Pulsende	0 ms (Referenz)	30 ms Abstand	100 ms Abstand	300 ms Abstand
ΔT in K (10 s)	1,38	1,83	1,69	1,68
Relative Erhöhung	-	32%	22%	22%

4. Diskussion

Eine messbare Erhöhung des Energieeintrags durch die zeitliche Streckung der Blitzfolgen konnte experimentell an CFK nachgewiesen werden. Die genaue Quantifizierung wird jedoch durch verschiedene Faktoren beeinflusst:

1. Die Nutzung des 6 mm dicken CFK als kalorimetrischen Sensor für den Energieeintrag ist problematisch, da sich während der Messzeit kein thermisches Gleichgewicht über die Schichtdicke herausbildet, die gemessene Oberflächentemperatur skaliert demnach nichtlinear mit dem Energieeintrag und ist zudem zeitabhängig.
2. Das thermische Nachleuchten der Blitzlampen verfälscht die gemessene Oberflächentemperatur zumindest im Kurzzeitbereich.
3. Durch die räumliche Anordnung der vier Blitzlampen entstehen auch räumliche Inhomogenitäten. Wenn die Temperatur nur in einem kleinen Probenabschnitt betrachtet wird (siehe Abb. 5), ist der zeitliche Verlauf vor allem von der Blitzlampe bestimmt, die diesen Bereich am stärksten bestrahlt. Das wiederum hat Einfluss auf die Wahl des zeitlichen Bezugspunktes.

Durch Wahl eines geeigneten Zeitpunktes (10 s nach dem letzten Blitz), die Einhaltung der Reihenfolge der Einzelblitze sowie eine ortsfeste reproduzierbare Anordnung von Anregungsquellen und Probekörper wurde versucht, diesen Faktoren Rechnung zu tragen.

Im Gegensatz zu den genannten Referenzen wurden in diesem Beitrag keine Kontraste an Fehlstellen betrachtet, sondern nur die eigentliche Energieeinkopplung. Die Auswertung der Messdaten an den an den FBB führte zu Kontrasterhöhungen im ähnlichen Umfang (hier nicht gezeigt). Damit liegen die Ergebnisse der Messungen in geringem Abstand im gleichen Größenbereich wie in [1, 2].

Die Verstärkung der Energieeinkopplung bei größerem Abstand bzw. geringerer Energiedichte war nach den Vorbetrachtungen nicht zu erwarten gewesen. Eine mögliche Erklärung wird in der vereinfachten Betrachtung der Konvektion gemäß Abb. 2 gesehen, wo mit einem konstanten Wärmeübergangskoeffizienten für ruhende Luft von $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ gerechnet wurde. Man kann sich jedoch vorstellen, dass sich bei hohen Oberflächentemperaturen an der CFK-Platte eine Luftströmung aufbaut, welche die Wärmeverluste deutlich erhöht (freie Konvektion). Weiterhin ist auch mit dem Auftreten einer Druckwelle an den Blitzlampen zu rechnen, die durch die schlagartige Erwärmung der im Reflektor ruhenden Luft hervorgerufen wird. Man kann diese Luftwelle sichtbar machen, wenn man ein Blatt Papier vor dem Reflektor einer Blitzlampe positioniert, welches unmittelbar nach dem Blitz etwas flattert.

Diese beobachtete Erhöhung der Energieeinkopplung ließe sich durch einen temperaturabhängigen Konvektionsterm erklären, der bei hohen Temperaturen sättigt. Würde die Sättigung bereits nach einem Blitz aus direkter Nähe auftreten, hätte die zeitliche Streckung keinen Effekt mehr. Bei niedrigeren Temperaturen, d.h. bei einem Blitz aus größerer Entfernung, wäre die Sättigung noch nicht erreicht. Hier würde ein leistungsstärkerer Blitz

(bzw. vier gleichzeitig gezündete Blitzlampen) zu deutlich höheren Konvektionsverlusten führen. Durch die zeitliche Streckung des Energieeintrags könnten dann die erhöhten Konvektionsverluste vermieden werden.

Diese Vermutung müsste durch weitere Untersuchungen verifiziert werden, z.B. durch systematische Abstandsvariation, durch Variation der Blitzenergie sowie durch Laseranregung bei verschiedenen Leistungen und Pulslängen. Eine Klärung der zugrunde liegenden physikalischen Prozesse würde den Weg zu einer optimierten Energieeinkopplung bei der Blitzthermografie eröffnen und damit helfen, die Leistungsfähigkeit dieses ZfP-Verfahrens zu erhöhen.

5. Zusammenfassung

Anhand von einfachen theoretischen Überlegungen lässt sich zeigen, dass die bei pulsartiger Erwärmung auftretenden hohen Oberflächentemperaturen zu verstärkten Energieverlusten führen müssten, besonders bei schlecht wärmeleitenden Materialien. Im Interesse einer optimalen Energieausnutzung sowie zum Schutz des Materials vor Schädigung sollten die Maximaltemperaturen bei Blitzanregung begrenzt werden. Es wurde gezeigt, dass die zeitliche Streckung des Anregungspulses durch eine Folge von Einzelpulsen zu einer leichten Verbesserung der Energieeinkopplung führt. Unter bestimmten Umständen kann dieser Effekt deutlich stärker ausfallen als es bei Annahme der üblichen Wärmeverlustmechanismen zu erwarten wäre. Als Ursache wird ein nichtlinearer Konvektionsterm vermutet.

Referenzen

- [1] A. Ziadi, F. Galmiche und X. Maldague „Pulse shaping in infrared thermography for nondestructive evaluation“, *Review of Scientific Instruments* 74, 1 (2003), S. 411 – 413.
- [2] X. Maldague, A. Ziadi und M. Klein „Double pulse infrared thermography“, *NDT&E International* 37 (2004), S. 559 – 564.
- [3] S. Neuhäusler, G. Zenzinger, T. Krell und V. Carl „Optimierung der Impuls-Thermografie-Prüftechnik durch Laserscans und Blitzsequenzen“, *DGZfP-Berichtsband 86-CD, Thermografie-Kolloquium 2003, Vortrag 3*.
- [4] Z. Yang, W. Zhang, G. Tian, R. Li und Y. Song „Multi-Pulse Infrared Thermography Applied to Improve Defect Detectability of Composites“, *Applied Mechanics and Materials* Vol. 58-60 (2011), S. 463 – 468.
- [5] R. Krankenhagen und C. Maierhofer „Measurement of the radiative energy output of flash lamps by means of thermal thin probes“, *Infrared Physics & Technology* 67 (2014), 363 – 370.