

# Visualisierung von Schallemissionslokalisierungen

Wolfgang SKOPALIK, Markus G.R. SAUSE, Siegfried HORN, Universität Augsburg;  
Thomas KÖCK, SGL Carbon, Meitingen

**Kurzfassung.** Bei Brüchen an Grobkorngraphit versagt die klassische Bruchmechanik und der Rissfortschritt ist nur schwer bestimmbar. Dies stellt ein Problem für die Bestimmung von Materialgrößen wie z.B. der Risszähigkeit dar. Einen Ausweg bieten Methoden der Schallemissionsanalyse. Die Erfassung der freigesetzten Schallemissionsenergie erlaubt eine alternative Quantifizierung des Rissfortschritts. Weiterhin ist es durch Schnittbilderserien möglich, die Verteilung der Schallaktivität darzustellen und Gebiete mit erhöhter Aktivität ausfindig zu machen. Dies erlaubt Rückschlüsse auf die Rissentwicklung und damit auf die Materialeigenschaften verschiedener Graphitproben und -arten.

Hier wird eine Implementierung für verschiedene Visualisierungsmöglichkeiten zur Darstellung der Lokalisierung von Schallemissionsereignissen im Verlauf einer 3-Punkt-Biegung an Graphitproben vorgestellt.

In einfachen 2-dimensionalen Punktdiagrammen führen die Überlagerung mehrerer lokalisierter Punkte sowie die Mehrfachlokalisierung in einem Punkt zu einem Verlust an Information. Der Übergang zu farbcodierten 2-dimensionalen Dichtediagrammen und 3-dimensionalen Schnittbilderserien erlaubt die Darstellung dieser Information. Ein zusätzlicher Vorteil ist der direkte Vergleich zwischen der orts aufgelösten Schallemissionsaktivität und anderen zerstörungsfreien Verfahren, deren Ergebnisse als Schnittbilder vorliegen, wie z.B. Computertomographie-Aufnahmen.

Zusätzlich können die Lokalisierungsdaten über die Zeit kumuliert oder intervallweise dargestellt werden. Dies erlaubt die Visualisierung des zeitlichen Fortschritts der Schädigung, z.B. des Risswachstums. Des Weiteren benötigt die Software zur volumetrischen Darstellung lediglich die Koordinaten  $(x, y, z)$ , sowie für zeitaufgelöste Visualisierungen die Zeit.

Am Beispiel von Bruchvorgängen in Graphit wird auf die Vorteile von Dichtediagrammen gegenüber einfachen Punktdiagrammen eingegangen sowie die Möglichkeit von 3-dimensionalen Schnittbildern und zeitaufgelösten Bilderserien der Lokalisierungen demonstriert.

## 1. Einleitung

Für die Lokalisierung von Schallemissionsquellen (SE-Quellen) stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Die meisten konventionellen Verfahren beruhen auf hyperbolischen Ortungsalgorithmen, die zur Bestimmung der Wellenankunftszeit Schwellwertverfahren oder vergleichbare Kriterien nutzen [11]. Bei der Nutzung von mehreren Sensoren kann so eine Ortung in drei Raumdimensionen vorgenommen werden. Lokalisierungsergebnisse werden herkömmlich zumeist nur in einfachen Punktdiagrammen dargestellt, wobei die 3-dimensionalen Lokalisierungsergebnisse auf eine frei wählbare 2-dimensionale Ebene projiziert werden. Eine entscheidende Schwachstelle dieser Darstellung besteht darin, dass die Projektion 3-dimensionaler Lokalisierungsergebnisse in eine 2-dimensionale Ebene zur Überlagerung mehrerer

Datenpunkte führen kann. Eine alternative Darstellungsart sind Dichtediagramme, in denen aus einer diskreten Punktverteilung ein kontinuierlicher lokaler Dichtewert errechnet und farbcodiert dargestellt wird. Dabei führen Überlagerungen von Datenpunkten zu einer erhöhten Dichte und können über einen geänderten Farbwert visualisiert werden. Geht man zusätzlich von einer einzelnen Projektion des kompletten Datensatzes auf eine einzige 2-dimensionale Fläche über zu Schnittbilderserien, so lässt sich eine deutlich bessere Darstellung der 3-dimensionalen Daten erzielen. Dies erlaubt es Inhomogenitäten und Quellen starker SE-Aktivität einfacher ausfindig zu machen, als dies in herkömmlichen Punktdiagrammen möglich wäre. Somit lassen sich Schädigungen auch für Materialien mit hoher Schallemissionsaktivität deutlich darstellen und untersuchen.

Bei den hier gezeigten Untersuchungen von Bruchvorgängen an eingekerbten Grobkorngraphitproben lässt sich der Rissfortschritt optisch nur schwer bestimmen, da die Rissfront aufgrund von Materialinhomogenitäten komplex verläuft [1, 2, 9]. Dadurch ergibt sich eine stark strukturierte, unebene Rissfläche, deren an der Probenoberfläche optisch beobachtbare Rissfront nicht repräsentativ für das Risswachstum im Volumen der Probe ist. Dadurch sind fundamentale Materialkennwerte, die eine Ermittlung der Bruchfläche voraussetzen, wie z.B. die Risszähigkeit  $K_{Ic}$  mit klassischen Ansätzen der Bruchmechanik nur unzureichend bestimmbar [3, 8]. Die Schallemissionsanalyse (SEA) bietet alternative Ansätze zur Quantifizierung der Risszähigkeit. Dies setzt voraus, dass die als Funktion der Belastung aufgezeichneten SE-Signale der für das Versagen verantwortlichen Schädigung im Material entsprechen. Unter dieser Voraussetzung kann die Energie dieser Signale mit der bruchmechanischen Energie korreliert werden und für eine Bestimmung der Risszähigkeit herangezogen werden. Die hier untersuchten Bruchvorgänge zeigen eine stark inhomogene Verteilung der Schallemissionsaktivität und ermöglichen somit eine direkte Korrelation zwischen den Orten der Schallemission und den Orten der Schädigung im Material.

Das Ziel dieser Untersuchung ist es daher, Orte erhöhter Schallaktivität durch ortsaufgelöste Dichtediagramme zu identifizieren und den Schädigungsfortschritt zeitaufgelöst zu visualisieren und damit zu einem besseren Verständnis des Bruchverhaltens von Grobkorngraphit beizutragen. Dazu wurde im Rahmen der Untersuchungen die Software „DensityVille“ entwickelt, die im Folgenden vorgestellt wird.

## **2. Softwarefunktionen**

### *2.1 Dichteberechnung*

Die Software „DensityVille“ benötigt als Eingabedaten die Lokalisierungsergebnisse als  $(x, y, z)$ -Koordinaten und für zeitaufgelöste Bilderserien zusätzlich den Zeitpunkt der Lokalisierung in  $(x, y, z, t)$ -Koordinaten. „DensityVille“ hat zwei verschiedene Grundoptionen der Visualisierung von Lokalisierungsergebnissen:

- ortsaufgelöste Darstellung der Dichte
- zeitaufgelöste Darstellung der Dichte

Für die Darstellung orts aufgelöster Dichtediagramme wird die Probe virtuell in Scheiben entlang einer gewählten Richtung zerlegt. Für diese Scheiben wird die Lokalisierungsichte einzeln in der jeweiligen Tiefe berechnet.

Für die zeitaufgelöste Darstellung der Dichtediagramme wird die Schallemissionsaktivität entweder bis zum dargestellten Zeitpunkt  $t$  aufsummiert, oder wahlweise in zeitliche Intervalle zerlegt. Die lokale Dichte am Punkt  $\vec{r}$  berechnet sich gemäß:

$$\rho(\vec{r}, t) = \sum_i N(\vec{r}_i, t_i) \cdot g(|\vec{r} - \vec{r}_i|), \quad \text{für: } |\vec{r} - \vec{r}_i| \leq d, \quad t_1 < t_i < t_2 \quad (\text{Formel (1)})$$

Dabei bedeutet:

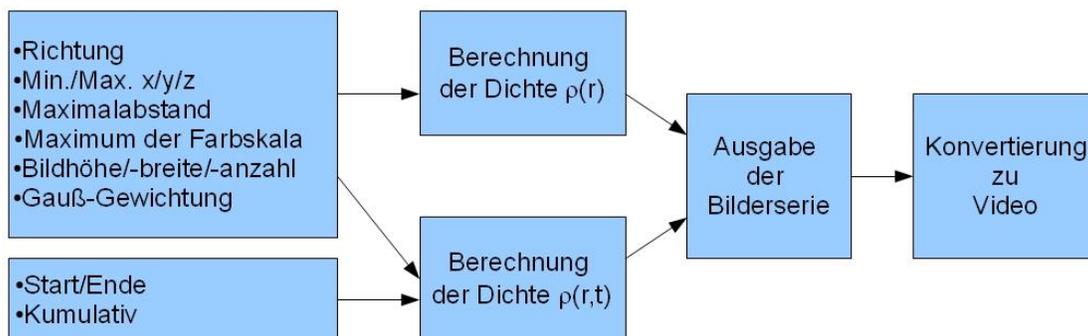
$\rho(\vec{r}, t)$	Dichte der lokalisierten Ereignisse am Punkt $\vec{r}$
$\vec{r}_i$	Ort des Ereignisses $i$ des Datensatzes
$N(\vec{r}_i, t_i)$	Anzahl der lokalisierten Ereignisse am Punkt $\vec{r}_i$
$g( \vec{r} - \vec{r}_i )$	Gauß-Gewichtung des Abstand $ \vec{r} - \vec{r}_i $
$d$	Maximalabstand zur Berechnung der Dichte

Es wird für jeden Punkt  $\vec{r}$  die Ereignisdichte berechnet, indem Punkte in der Umgebung innerhalb des Intervalls  $|\vec{r} - \vec{r}_i| \leq d$  berücksichtigt werden. Werden an einem Punkt  $\vec{r}_i$  der Probe innerhalb des Maximalabstands ein oder sogar mehrere Punkte lokalisiert (dementsprechend  $N(\vec{r}_i) = 1, 2, \dots$ ) werden diese in der Ereignisdichte aufsummiert. Für zeitaufgelöste Darstellungen muss der Zeitpunkt  $t_i$  des Ereignisses zusätzlich innerhalb des betrachteten Zeitintervalls  $[t_1; t_2]$  liegen.

Die optionale Gauß-Gewichtung der Ereignisdichte mit dem Abstand zwischen dem Punkt  $\vec{r}$  und den umgebenden Datenpunkten bedeutet physikalisch, dass Ereignissen mit größerem Abstand zu  $\vec{r}$  weniger Gewicht gegeben wird. Ihr Beitrag zur Dichte am betrachteten Punkt  $\vec{r}$  ist also geringer.

## 2.2 Eingabeparameter

Der schematische Ablauf des Programms gestaltet sich wie folgt (Bild 1):



**Bild 1.** Optionen und Eingabeparameter von „DensityVille“

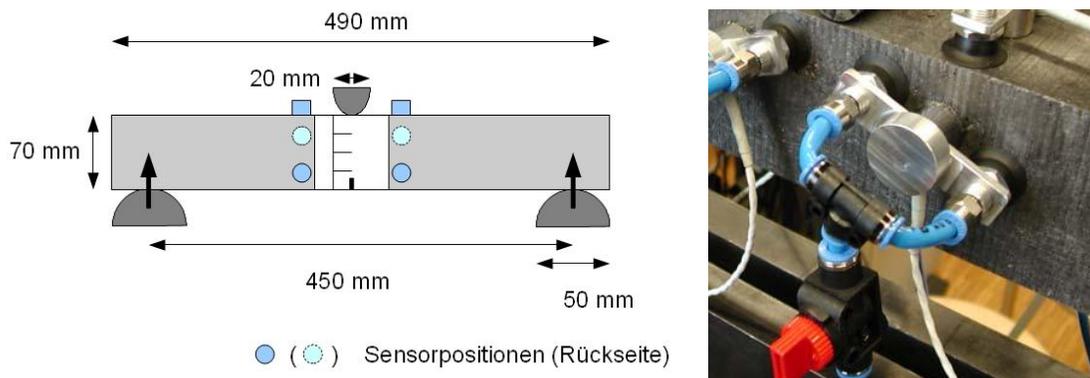
Sowohl die zeit- als auch die orts aufgelösten Dichtediagramme können als Projektion auf die  $(x, y)$ -,  $(y, z)$ - oder  $(x, z)$ -Ebene dargestellt werden. Hierzu benötigt das Programm die Eingabe der Richtung orthogonal zur Projektionsebene. Für die zeitaufgelösten

Dichtediagramme ist alternativ auch eine perspektivische Ansicht möglich. Für alle Optionen wird das Minimum und Maximum des dargestellten Bereichs benötigt. Für die orts aufgelösten Darstellungen sind dies die Grenzen der x-, y- und z-Koordinaten, für die zeitaufgelösten Darstellungen werden zusätzlich Start- und Endzeitpunkt des darzustellenden Zeitbereichs der Messung benötigt. Zur Berechnung der Dichte werden nur Punkte  $\vec{r}_i$  innerhalb des Maximalabstands  $d$  berücksichtigt. Die errechnete lokale Dichte wird in einer Farbskala dargestellt, die sich von blau für niedrige Dichten über grün nach rot für hohe Dichten erstreckt. Das Minimum der Farbskala entspricht dem Dichtewert 0. Der Dichtewert für das Maximum der Farbskala kann vom Nutzer frei gewählt werden. Die Bildauflösung ist durch die Bildhöhe, -breite und -anzahl bestimmt. Mit der optionalen Gauß-Gewichtung kann man festlegen, ob zur Berechnung der lokalen Dichte am Ort  $\vec{r}$  die umliegenden Datenpunkte zusätzlich mit ihrem Abstand zu  $\vec{r}$  gewichtet werden sollen. Für zeitaufgelöste Dichtediagramme kann ausgewählt werden, ob die Bilder kumulativ oder intervallweise dargestellt werden sollen. Dabei bedeutet kumulativ, dass im n-ten Dichtediagramm alle Datenpunkte von 0 bis zum Zeitpunkt  $t_n$  komplett dargestellt werden, während intervallweise bedeutet, dass nur die Lokalisierungen im Zeitintervall von  $t_{n-1}$  bis  $t_n$  dargestellt werden.

Neben der Visualisierung von lokalisierten Schallemissionsquellen ist es mit der Software „DensityVille“ auch möglich beliebige anderweitig erzeugte (x, y, z, t)-Datensätze darzustellen. Es muss dazu lediglich das entsprechende ASCII-Eingabeformat vorliegen [10]. Als Ergebnis erhält man entsprechend der verwendeten Option zeit- oder orts aufgelöste Dichtediagramme. Diese lassen sich anschließend zu Filmen zusammenfügen. Im Folgenden werden die Möglichkeiten des Programms anhand von Lokalisierungen von Schallemissionsquellen an Grobkorngraphit vorgestellt.

### 3. Proben, Messaufbau und –ablauf

Für die Messungen werden einseitig gekerbte Biegeproben (Single Edge Notched Bend) aus Grobkorngraphit verwendet. Diese haben die Abmessung 490 x 70 x 70 mm und eine Kerbe von 7 mm Tiefe. Die Probe wird mittig im vorgesehenen Bruchbereich weiß lackiert, um den Kontrast für die optische Beobachtung des Rissfortschritts zu erhöhen.



**Bild 2.** links: Versuchsaufbau, rechts: Befestigung der Sensoren an der Probenrückseite

Zur Belastung der Proben wird eine Materialprüfmaschine Zwick 1464 verwendet bei einem Auflagerdurchmesser von jeweils 50 mm und einem Abstand von 450 mm (Bild 2 links). Die 3-Punkt-Biegung an den Graphitproben erfolgt bei konstantem Vorschub mit

einer Geschwindigkeit von 0,002 mm/s. Um den optischen Rissverlauf an der Probenoberfläche festzuhalten wird der Bruchvorgang mit einer Videokamera aufgenommen.

Die Schallemission wird mit einem 6-Kanal PCI-2 System (Physical Acoustics) mit 40dB Vorverstärkung und einem Schwellwert von 35 dB aufgezeichnet. Zusätzlich wird ein Bandpass von 20 kHz – 1 MHz verwendet, um Umgebungs- und Störgeräusche zu filtern. Auf der Probe werden sechs WD-Breitbandsensoren (Physical Acoustics) mithilfe von Saugnäpfen befestigt, die während der Messung kontinuierlich evakuiert werden (Bild 2 rechts). Die Befestigung mit Saugnäpfen wurde eigens entwickelt, da die Probenabmessung und die Materialbeschaffenheit andere Befestigungsmöglichkeiten, wie Klammern oder magnetische Halter nicht zulassen. Durch die Befestigung mit Saugnäpfen entstehen bei sorgfältiger Anbringung keine Störgeräusche im Messbetrieb. Die Verwendung von sechs Schallemissionssensoren erlaubt bei vergleichbarer Sensitivität eine vollständige Erfassung des Bereichs, in dem sich der Riss ausbreitet.

Die Messung wird fortgesetzt, bis die Proben komplett durchbrochen sind. Im Anschluss werden die aufgezeichneten SE-Signale mit der Software AEWin synchronisiert [5], d.h. die Signale der sechs einzelnen Sensoren werden anhand ihrer Ankunftszeiten zu Schallereignissen zusammengefasst. Diese werden im Anschluss unter Zuhilfenahme der Softwarepakete AWARE++ [6] und All2sdf [7] in das von PolarAE verwendete \*.sdf-Format konvertiert. Danach werden die SE-Signale mit PolarAE lokalisiert und die resultierenden Lokalisierungsergebnisse mit „DensityVille“ visualisiert.

Innerhalb der verwendeten Software PolarAE werden überdeterminierte Lokalisierungsergebnisse dazu genutzt, um die Genauigkeit des Lokalisierungsergebnisses zu optimieren und eine Angabe des Lokalisierungsfehlers zu machen [4].

## 4. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Messergebnisse an Grobkorngraphit anhand von Beispieldiagrammen vorgestellt.

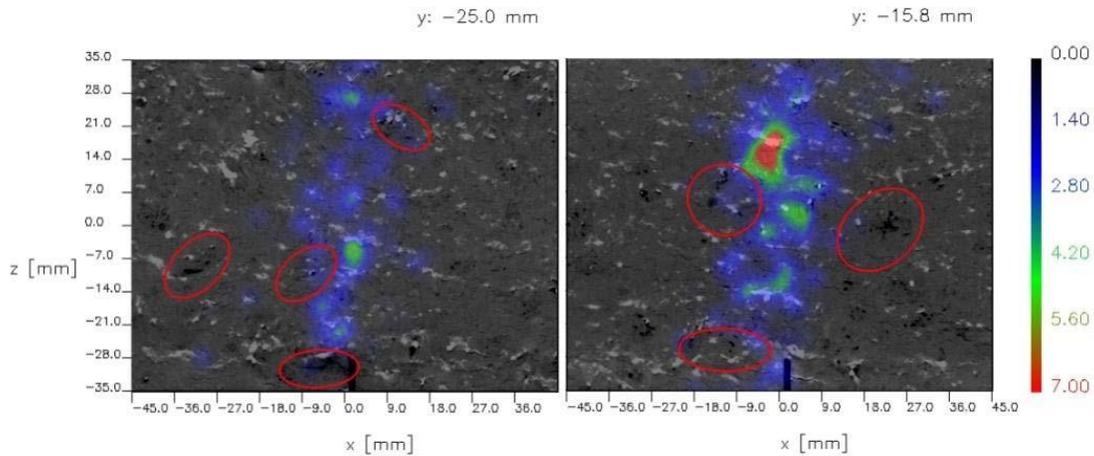
### 4.1. Ortsaufgelöste Dichtediagramme

Ortsaufgelöste Dichtediagramme eignen sich zur Darstellung von Inhomogenitäten der während der Messung auftretenden Verteilung von Schallquellen innerhalb einer Probe. Dabei heben sich Orte hoher Schallemissionsdichte, im Folgenden SE-Hotspots genannt, deutlich hervor.

Diese virtuellen Schnittbilderserien des Probenvolumens eignen sich darüber hinaus auch hervorragend zum Vergleich mit anderen zerstörungsfreien Analyseverfahren, wie z.B. Computer-Tomographie-Aufnahmen oder Ultraschall-Tomographie. Die Überlagerung eines solchen Dichtediagramms mit einer Computer-Tomographie-(CT)-Aufnahme ist in Bild 3 gezeigt. Die Ausgabe des Bildes erfolgt mit Skalenangaben für den dargestellten Achsenbereich der Projektionsebene, der Tiefenangabe entlang der Projektionsachse der Schicht und einer Legende für die Farbwerte.

Die in Bild 3 deutlich sichtbaren SE-Hotspots, erkennbar an der roten Einfärbung, lassen bei den hier untersuchten Graphitproben auf Einschlüsse schließen, die den Rissfortschritt erschweren. Eine mögliche Ursache für einen solchen SE-Hotspot ist beispielsweise ein großes Korn im Ausbreitungsgebiet der Rissspitze, welches als Rissinhibitor fungiert [1] und zahlreiche Schallemissionen an dieser Stelle zur Folge hat. Diese Interpretation ist in Übereinstimmung mit den Computertomographieaufnahmen. Hier korreliert die SE-Aktivität mit den aus den CT-Aufnahmen ermittelten Positionen der Körner (niedrige SE-

Aktivität), sichtbaren Einschlüssen hoher Dichte und vorhandenen Rissen (hohe SE-Aktivität).

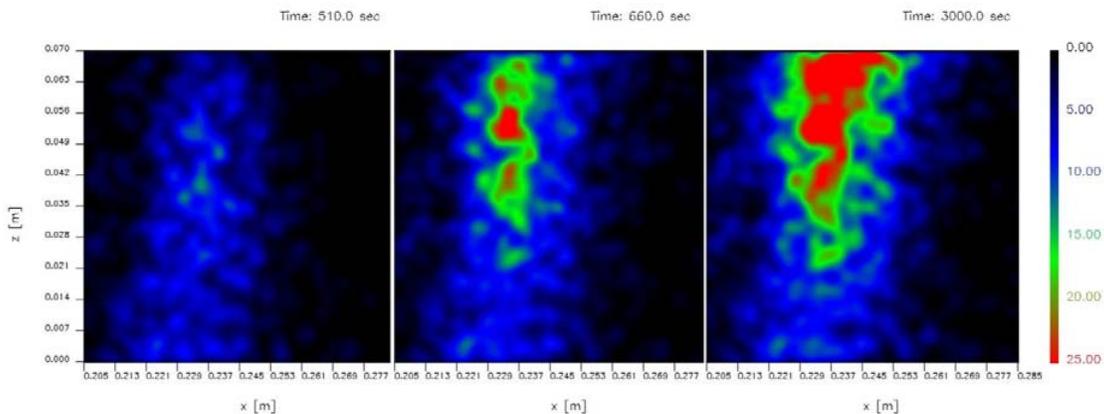


**Bild 3.** Überlagerung eines ortsaufgelösten Dichtediagramms mit der entsprechenden Computertomographie-Aufnahme vor der Belastung (Lage der Körner rot markiert)

Ein Vergleich der in Bild 3 gezeigten Messergebnisse von CT und Schallemission ermöglicht eine direkte Korrelation zwischen Materialinhomogenitäten und bruchmechanischem Verhalten und kann zur Identifizierung von Schwachstellen im Material beitragen.

#### 4.2. Zeitaufgelöste Dichtediagramme

Zeitaufgelöste Dichtediagramme zeigen die zeitliche Ausbreitung von SE-Quellen, wie z.B. das Risswachstum innerhalb einer Probe. Die räumliche Projektion der ausgegebenen Dichtediagramme entspricht denen der ortsaufgelösten Option. An Stelle der Tiefe wird jedoch der Zeitpunkt des Schallemissionsereignisses angezeigt (Bild 4). Das Zusammenfügen der Bilderserien zu einem Video ermöglicht eine gute Darstellung des zeitlichen Ablaufs der Entstehung von SE-Quellen. Die Schallemissionsaktivität beim Fortschreiten des Risses ist in Bild 4 deutlich zu erkennen.



**Bild 4.** Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Schallemissionsquellen beim Bruchvorgang von Graphit (Zeitpunkte relativ zum Beginn der Belastung)

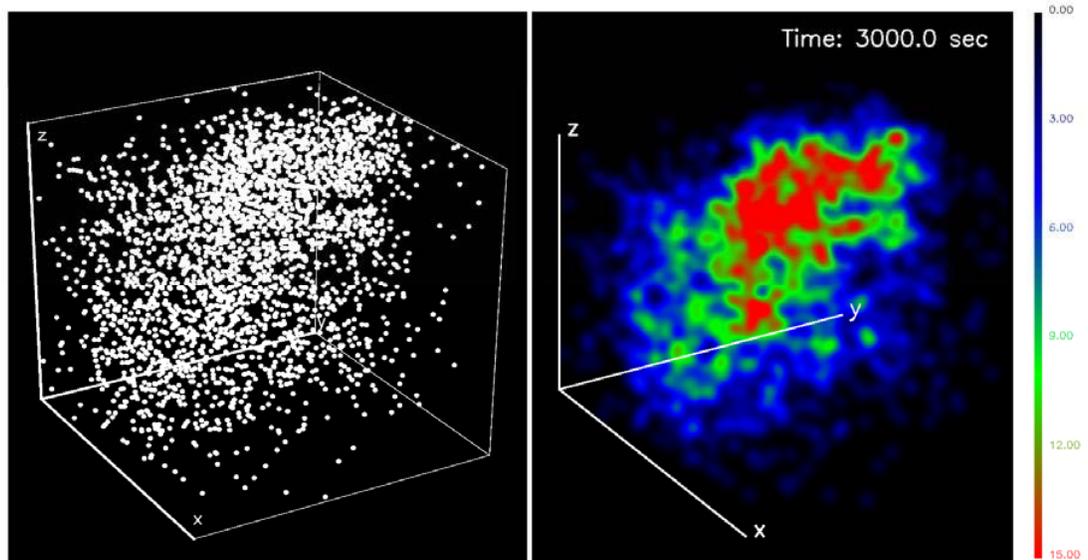
Im Vergleich zu homogenen Werkstoffen zeigt sich bei Grobkorngraphit eine sehr breite Verteilung von Schallemissionsquellen um die optisch beobachtete Risspitze von bis zu 30 mm. Diese Schallemission wird vermutlich von Mikrorissen verursacht, die der optisch beobachtbaren Risspitze vorausseilen [1, 2, 9]. Ein Vergleich der Verteilung der SE-Quellen mit Computer-Tomographie-Aufnahmen aus [9] zeigt eine prinzipielle Übereinstimmung der Form und in der zeitlichen Entwicklung des Bruchvorgangs im Inneren einer Grobkorngraphitprobe.

Die mittels Schallemission ermittelte Verteilung der Schädigungen beim Rissvorgang kann im Weiteren dazu genutzt werden, um das Werkstoffverhalten inhomogener Materialien besser zu verstehen und Simulationen des Bruchvorgangs zu optimieren.

#### 4.3. Perspektivische Darstellung der Dichte

Die Option für perspektivische Darstellung liefert das in Bild 5 rechts gezeigte Diagramm. Die Dichte der Schallquellen wird perspektivisch dargestellt und zusätzlich zeitlich aufgelöst. Die perspektivische Darstellung erfolgt auf eine Projektionsfläche im Raum im Gegensatz zu den normalen zeitaufgelösten Dichtediagrammen, die auf die (x, y)-, (x, z)- oder (y, z)-Flächen projiziert werden.

Dies kann gezielt genutzt werden um SE-Hotspots sichtbar zu machen, die durch Projektion auf die (x, y)-, (x, z)- oder (y, z)-Flächen verborgen bleiben. Die zeitliche Auflösung ermöglicht die Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Schallemissionsaktivität im Volumen der Probe.



**Bild 5.** Darstellung der Schallemissionsquellen bei einem Bruchvorgang an Grobkorngraphit mittels eines Punktdiagramms (links) und eines Dichtediagramms (rechts) in perspektivischer Ansicht (Zeitpunkte relativ zum Beginn der Belastung)

## 5. Zusammenfassung

Mit der Software „DensityVille“ lassen sich  $(x, y, z, t)$  - Lokalisierungsdaten in orts- und zeitaufgelösten Dichtediagrammen darstellen. Es wurde gezeigt, dass eine inhomogene Verteilung der Schallemissionsquellen durch die vorgestellten Dichtediagramme wesentlich besser visualisiert werden kann, als durch konventionelle zweidimensionale Punktdiagramme.

Bei den Untersuchungen an Grobkorngraphit zeigt sich in den Dichtediagrammen eine breite Streuung der lokalisierten Schallemissionsquellen um den optisch beobachteten Rissverlauf, welche vermutlich auf Mikrorisse zurückzuführen sind, die der optisch beobachtbaren Risspitze vorauslaufen. Darüber hinaus sind in den zeitlich aufgelösten Diagrammen deutliche räumliche Schwankungen der Schallemissionsaktivität zu erkennen, die auf den unterschiedlichen Einfluss der Bestandteile im Grobkorngraphit zurückzuführen sind.

Die Software „DensityVille“ bietet zahlreiche Möglichkeiten zur Visualisierung von  $(x, y, z, t)$ -Lokalisierungsdaten von Schallemissionsquellen, die dem Anwender große Freiheiten bei der Darstellung erlauben.

## Referenzen

- [1] B. Allard, D. Rouby, G. Fantozzi, D. Dumas, P. Lacroix „Fracture Behaviour of Carbon Materials“, Carbon Vol. 29, No. 3, pp. 457-468 (1991)
- [2] M. Sakai, J. Yoshimura, Y. Goto, M. Inagaki, „R-Curve Behavior of a Polycrystalline Graphite: Microcracking and Grain Bridging in the Wake Region“, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 71, No. 8 (1988)
- [3] M. Sakai, K. Urashima, M. Inagaki, „Energy Principle of Elastic-Plastic Fracture and Its Application to the Fracture Mechanics of a Polycrystalline Graphite“, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 66 Issue 12, pp. 868-874 (1983)
- [4] N. Rosenbusch, J.H. Kurz, F. Finck, „PolarAE – Funktionen und Bedienung“, Institute of Construction Materials (IWB), University of Stuttgart (2003)
- [5] „AEwin Software – Installation, Operation and User’s Reference Manual“, AEwin Software User’s Manual Rev. 2.00, Physical Acoustics Corporation (2004)
- [6] M. G. R. Sause, “AWARE++ Advanced Waveform Analysis Research Engine - Software Manual Rev. 1”, URL: <http://www.physik.uni-augsburg.de/exp2/downloads.de.shtml>, University of Augsburg (2009)
- [7] „All2sdf – Online Help Rev. 4.0“, Institute of Construction Materials (IWB), University of Stuttgart (2005)
- [8] P. Ouagne, G.B. Neighbour, B. McEnaney, „Crack growth resistance in nuclear graphites“, Journal of Physics D: Applied Physics, 35, pp. 927-934 (2002)
- [9] A. Hodgkins, J. Marrow, P. Mummary, B. Marsden, A. Fok, L. Babout, „Fracture behaviour of nuclear graphite“, 2nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Paper E22 (2004)
- [10] W. Skopalik, M. G. R. Sause, “DensityVille Manual Rev. 0.99 -beta-“, URL: <http://www.physik.uni-augsburg.de/exp2/downloads.de.shtml>, University of Augsburg (2009)
- [11] H. Kühnicke, E. Schulze, D. Voigt, „Verbesserte Lokalisation mittels Signalformanalyse“, 16. Kolloquium Schallemission 2007 – Vortrag 07 (2007)