

# Numerical AE3D – Ein freies Simulationstool zur Berechnung und Visualisierung von Schallemissionsproblemen

Frank SCHUBERT<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme, IKTS, Dresden

Kontakt E-Mail: Frank.Schubert@ikts.fraunhofer.de

**Kurzfassung.** Der vorliegende Artikel beschreibt *Numerical AE3D*, einen freien Solver (Löser) zur Berechnung und Visualisierung raumzeitlicher Schallemissionsereignisse sowie der von ihnen erzeugten elastischen Wellen. Das Programm erlaubt die Definition beliebig vieler SE-Ereignisse zu festgelegten Zeiten und an fest definierten Orten im Volumen eines dreidimensionalen Simulationsgebietes, die freie Verteilung von Sensoren auf der Oberfläche dieses Gebietes sowie die Berechnung der Wechselwirkung der erzeugten elastischen Wellen mit Strukturkomponenten und Begrenzungsflächen. Mit *Numerical AE3D* können idealisierte Schallemissionsdatensätze erzeugt und als Grundlage für Test, Validierung und Weiterentwicklung von Lokalisierungs- und weiterführenden SE-Algorithmen verwendet werden. *Numerical AE3D* besteht aus einer Windows-EXE mit frei editierbarer Texteingabedatei, die z.B. auch von einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI) erzeugt und gesteuert werden kann. Das Programm generiert Rohdaten in Form von ASCII- oder Binärdateien, die von externer Software gelesen, weiterverarbeitet und visualisiert werden können. Die leistungsfähige freie Basisversion des Solvers kann bei Bedarf jederzeit durch kunden- und anwendungsspezifische Funktionen erweitert werden.

## Einführung

In den vergangenen 20 Jahren sind im Fraunhofer IKTS (vormals IZFP-D) eine Reihe von Simulationstools auf Basis der Elastodynamischen Finiten Integrationstechnik (EFIT, [1-4]) entstanden und in Form einer solverbasierten und anwendungsspezifischen Modulbibliothek in zahlreichen F&E-Projekten eingesetzt und weiterentwickelt worden. Diese Simulationstools werden nunmehr schrittweise in einer leistungsfähigen Basisversion zur freien Verfügung gestellt. Den Anfang macht *Numerical AE3D*, ein Solver zur Berechnung und Visualisierung raumzeitlicher Schallemissionskaskaden sowie der von ihnen erzeugten elastischen Wellen.

Das Programm erlaubt die Definition beliebig vieler Schallemissionsereignisse zu festgelegten Zeiten und an fest definierten Orten im Volumen eines dreidimensionalen Simulationsgebietes. Zusätzlich können Oberflächenquellen als Modell für die häufig als Referenz verwendeten Bleistiftminenbrüche realisiert werden. Des Weiteren lassen sich beliebig viele Schallemissionsaufnehmer auf den Oberflächen des simulierten Bauteils festlegen. Anschließend kann die Wellenausbreitung von den multiplen Einzelquellen bis zu den verschiedenen Sensoren berechnet und in zweidimensionalen Schnittebenen sowie im dreidimensionalen Volumen als zeitliche Abfolge von Wellenfrontschnappschüssen ausgegeben



werden. Durch Anpassung des Simulationsgebietes auf eine Plattengeometrie können auch Probleme geführter Wellen berücksichtigt werden. Die Definition von weitgehend frei zu definierenden Streuern im ansonsten als homogen angenommenen Simulationsgebiet erlaubt ferner die Untersuchung komplexer Abschattungs-, Streu- und Modenkonversionseffekte.

Mit *Numerical AE3D* können idealisierte Schallemissionsdatensätze erzeugt und als Grundlage für Test, Validierung und Weiterentwicklung von Lokalisierungs- und weiterführenden SE-Algorithmen verwendet werden. *Numerical AE3D* besteht aus einer Windows-EXE mit frei editierbarer Texteingabedatei, die z.B. auch von einer externen grafischen Benutzeroberfläche (GUI) erzeugt und gesteuert werden kann. Das Programm generiert Rohdaten in Form von ASCII- oder Binärdateien, die von externer Software gelesen, weiterverarbeitet und visualisiert werden können. Die leistungsfähige freie Basisversion des Solvers kann bei Bedarf jederzeit durch kunden- und anwendungsspezifische Funktionen erweitert werden.

## 2. Grundkonzept

### 2.1 Solvertechnologie

Bei dem Simulationstool *Numerical AE3D* handelt es sich um einen sogenannten Solver (Löser), der ein spezifisches, eng begrenztes Problem aus dem Bereich der Zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) numerisch lösen kann. Die Eingabe der Modelldaten sowie die Ausgabe der Ergebnisse erfolgen auf standardisierte Art und Weise, so dass der Solver jederzeit in umfangreichere Softwareprogramme des Anwenders mit eigenständiger grafischer Benutzeroberfläche, Signalverarbeitung und Datenanalyse eingebunden werden kann. Er lässt sich aber auch unabhängig von jeder GUI benutzen.

Der Solver besteht aus einer ausführbaren Datei (Windows-Executable) mit zugehörigem Texteingabeprotokoll. Bei letzterem handelt es sich um eine frei editierbare ASCII-Datei, die mit jedem Standard-Editor geöffnet und bearbeitet werden kann. Bei Aufruf der Windows-EXE wird das Eingabeprotokoll eingelesen, das zugehörige numerische Modell aufgebaut und anschließend die eigentliche Berechnung durchgeführt. Alle numerischen Ergebnisse werden während und nach der Programmausführung in einem einheitlichen Format, wahlweise als ASCII- oder Binärdateien herausgeschrieben und können anschließend mit externen Programmen eingelesen, weiterverarbeitet und visualisiert werden.

Alternativ zum oben genannten Vorgehen können die Modellparameter der Eingabedatei auch durch eine vom Anwender selbst bereitgestellte Benutzeroberfläche grafisch festgelegt und abgespeichert werden. Der Aufruf des Solvers kann dann direkt aus der GUI heraus erfolgen. Auch die erzeugten Ergebnisse können anschließend durch die gleiche GUI eingelesen, bearbeitet und dargestellt werden.

Der Vorteil einer strikten Trennung von Benutzeroberfläche und Solver besteht darin, dass beide unabhängig voneinander weiterentwickelt und optimiert werden können, solange die Ein- und Ausgabedateien als Schnittstelle zwischen beiden unverändert bleiben.

### 2.2 Mathematisch-physikalische Grundlagen

Bei dem hier verwendeten Solver *Numerical AE3D* handelt es sich um einen dreidimensionalen numerischen Löser auf Basis der Elastodynamischen Finiten Integrationstechnik (EFIT, [1-4]). Diese rein numerische Technik hat gegenüber halbanalytischen Methoden den Vorteil, dass sämtliche relevanten wellenphysikalischen Phänomene wie z.B. Beugung, Interferenz, Modenumwandlung, Mehrfachstreuung, geführte Wellen, stehende Wellen und Eigenschwingungen etc. automatisch und ohne weitere Näherungen berücksichtigt werden.

Dieser Ansatz spielt seine Stärken insbesondere dann aus, wenn die betrachteten Wellenlängen in der gleichen Größenordnung liegen oder sogar größer sind als die relevanten Defekt- und Bauteilabmessungen.

EFIT ist ein Zeitbereichsverfahren und basiert auf der direkten expliziten Lösung zweier gekoppelter Grundgleichungen, der Bewegungsgleichung und der Spannungsratengleichung. Da die Diskretisierung an der *Integral*form der beiden Grundgleichungen ansetzt, ergibt sich ein sogenanntes gestaffeltes Raum-Zeit-Gitter, auf dem die Vektorkomponenten der Schallschnelle und die Komponenten des Spannungstensors auf unterschiedlichen Positionen lokalisiert sind. Nach Vorgabe eines i.A. breitbandigen Anregungssignals, beginnend mit  $t = 0$ , kann der gesamte Wellenausbreitungsvorgang in Raum und Zeit weiterverfolgt werden, exakt so, wie er sich üblicherweise auch in ZiP-Experimenten vollzieht. Eine EFIT-Simulation stellt somit im Rahmen der gewählten Modellkomplexität eine 1:1-Abbildung des realen Experiments dar, die unmittelbar zum Vergleich und zur Interpretation der gemessenen Befunde herangezogen werden kann.

Der in dieser Arbeit vorgestellte Basis-Solver *Numerical AE3D* verwendet für den Zusammenhang zwischen Spannung und Deformation ein Materialgesetz, das einem linear-elastischen, isotropen und heterogenen Medium entspricht. Bei Bedarf kann das Materialgesetz jederzeit auf komplexere Medien, z.B. mit Anisotropie, Viskoelastizität und ggf. auch Nichtlinearität erweitert werden.

### 3. Das Eingabeprotokoll

Sobald der Solver auf Konsolenebene ausgeführt wird, wird zunächst eine Parameterdatei mit allen relevanten Modellparametern eingelesen. Auf deren Grundlage wird das numerische Gitter sowie die Materialbelegung realisiert und die eigentliche Berechnung ausgeführt. Bei der Eingabedatei handelt es sich um eine ASCII-Textdatei, die mit allen gängigen Editoren geöffnet, gelesen und verändert werden kann. Alternativ dazu kann die Eingabedatei auch durch eine externe GUI erzeugt und abgespeichert werden.

Die freien Modellparameter sind in unterschiedliche Rubriken unterteilt und werden im Folgenden vorgestellt.

```
[Model_Dimensions]
xmax = 1000.0e-03
ymax = 1000.0e-03
zmax = 500.0e-03
tmax = 1.0e-03
```

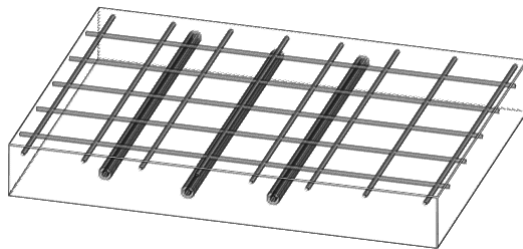
Die Rubrik `Model_Dimensions` definiert die Abmessungen des als rechteckig angenommenen Modellgebietes und somit die Lage der als spannungsfrei angenommenen äußeren Begrenzungen des simulierten Bauteils. Weiterhin wird die physikalische Zeitspanne festgelegt, in der sich der Wellenausbreitungsvorgang abspielt. Alle numerischen Werte werden in SI-Einheiten angegeben.

```
[Matrix]
cp = 3900.0
cs = 2350.0
rho = 2100.0
```

In der Rubrik `Matrix` werden die elastischen Eigenschaften des homogenen Grundmaterials festgelegt. Im hier behandelten linear-elastischen Fall sind das die Schallgeschwindigkeiten von P- und S-Welle sowie die Massendichte.

```
[Scatterer]
cp = 5900.0,4000.0,0.0
cs = 3200.0,2400.0,0.0
rho = 7800.0,3000.0,0.0
shape = cuboid,ellipsoid,cylinder
posx = 250.0e-03,500.0e-03,750.0e-03
posy = 350.0e-03,350.0e-03,350.0e-03
posz = 250.0e-03,300.0e-03,400.0e-03
radiusx = 40.0e-03,40.0e-03,60.0e-03
radiusy = 40.0e-03,30.0e-03,50.0e-03
radiusz = 10.0e-03,20.0e-03,30.0e-03
anglexy = 20.0,30.0,40.0
anglexz = 10.0,20.0,10.0
```

Unterer Scatterer kann eine beliebige Zahl unterschiedlicher Streuer in das Modell eingebaut werden. Die Eingaben je Streuer werden durch Kommata voneinander getrennt. Im obigen Beispiel sind drei verschiedene Objekte definiert. Für jedes einzelne von ihnen können die elastischen Eigenschaften, die Form (Quader, Ellipsoid oder Zylinder), die Lage des Streuerzentrums, die Ausdehnung in drei zueinander senkrechten Raumrichtungen sowie zwei Orientierungswinkel (in Grad) definiert werden. Damit lassen sich auch komplexe und realistische Aufbauten realisieren wie in Abb. 1 dargestellt.



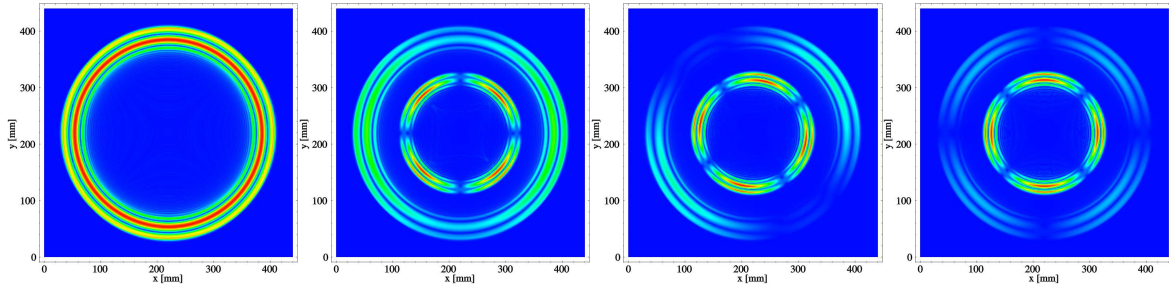
**Abb. 1.** Beispiel für das 3D-EFIT-Modell eines plattenförmigen Betontestkörper mit drei Spankanälen und schlaffer Bewehrung.

Luftgefüllte Hohlräume können zur Reduzierung des Rechenaufwandes als ideal reflektierende spannungsfreie Bereiche mittels  $cp = cs = rho = 0.0$  realisiert werden.

```
[AE Sources]
posx = 121.0e-03,433.0e-03,812.31e-03
posy = 345.0e-03,211.67e-03,745.44e-03
posz = 53.31e-03,498.60e-03,287.92e-03
tstart = 0.0e-06,21.0e-03,23.0e-03
signal = RC2,RC4,Impact2
cfrequency = 400.0e+03,500.0e+03,250.0e+03
m11 = 1.0,1.0,0.0
m22 = 1.0,1.0,0.0
m33 = 1.0,-2.0,0.0
m12 = 0.0,0.0,1.0
m13 = 0.0,0.0,0.0
m23 = 0.0,0.0,0.0
prefactor = 0.57735,0.40825,0.7071
```

In der Rubrik AE Sources kann eine beliebige Zahl von punktförmigen Quellereignissen definiert werden. Die Eingaben je Quelle werden wieder durch Kommata voneinander getrennt. Im obigen Beispiel sind drei verschiedene Schallemissionsereignisse definiert. Für jedes einzelne von ihnen kann der Ort, der Zeitpunkt, die Signalform (gefensterte Kosinusfunktionen oder Sinushalbwellen variabler Bandbreite), eine charakteristische Frequenz

(Mittelfrequenz bzw. effektive Maximalfrequenz) definiert werden. Zusätzlich werden die sechs unabhängigen Komponenten des symmetrischen Momententensors angegeben. Damit lassen sich isotrope Volumenänderungen, Scherdislokationen und linear angeordnete, kompensierte Vektordipole realisieren (Abb. 2).



**Abb. 2.** Beispiele verschiedener Momententensor-Realisierungen im 2D-Querschnitt (aus [5]).

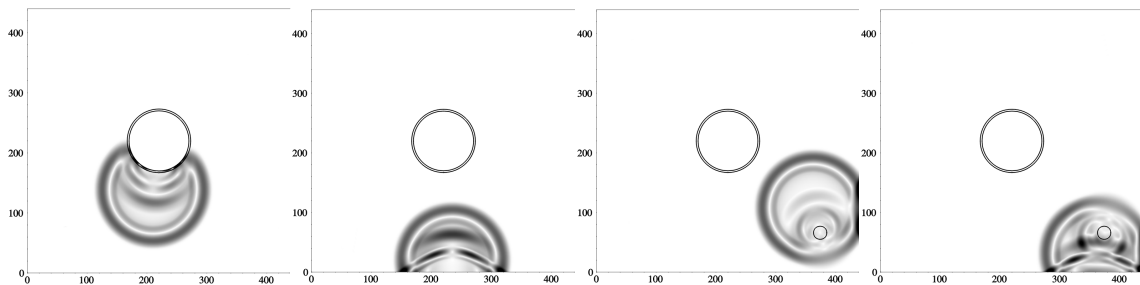
Für Skalierungs- und Normierungszwecke kann weiterhin ein Vorfaktor vor dem Momententensor definiert werden. Neben Volumenquellen lassen sich auch Oberflächenquellen als Modell für die häufig als Referenz verwendeten Bleistiftminenbrüche realisieren.

```
[Sensors]
posx = 200.0e-03, 400.0e-03, 600.0e-03, 800.0e-03
posy = 500.0e-03, 500.0e-03, 0.0e-03, 1000.0e-03
posz = 500.0e-03, 500.0e-03, 100.0e-03, 0.0e-03
shape = ellipse, ellipse, ellipse, rectangle
radius1 = 15.0e-03, 15.0e-03, 15.0e-03, 20.0e-03
radius2 = 15.0e-03, 20.0e-03, 15.0e-03, 10.0e-03
```

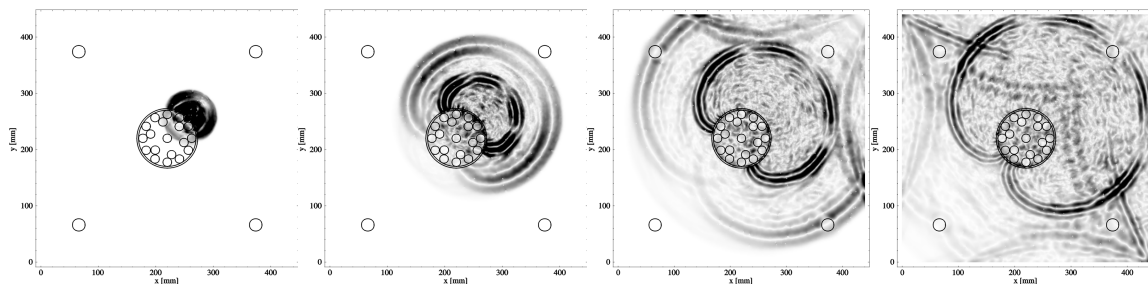
Unter `sensors` kann eine beliebige Zahl von Schallemissionsaufnehmern definiert werden. Die Eingaben je Sensor werden durch Kommata voneinander getrennt. Im obigen Beispiel sind vier Wandler definiert. Für jeden einzelnen kann der Ort sowie die Form und Größe der Apertur festgelegt werden. Unterstützt werden rechteckige und ellipsenförmige (im Spezialfall auch kreisförmige) Aperturen, über die das berechnete Zeitsignal gemittelt wird. Befindet sich der Sensor nicht an der Oberfläche sondern im Volumen des Bauteils, werden die Angaben zur Apertur ignoriert und stattdessen wird das Signal an dem definierten Ortspunkt im Modellvolumen herausgeschrieben. Standardmäßig werden alle drei Vektor-komponenten der Schallschnelle am Ort des jeweiligen Sensors ermittelt.

```
[Snapshots]
starttime = 6.5e-06
endtime = 130.0e-06
timestep = 13.0e-06
sect_xmin = 0.0
sect_xmax = 1000.0e-03
sect_ymin = 0.0
sect_ymax = 1000.0e-03
sect_zmin = 0.0
sect_zmax = 500.0e-03
slice_planex = 500.0e-03
slice_planey = 500.0e-03
slice_planez = 250.0e-03
vx = off
vy = off
vz = off
vabs = on
```

In der Rubrik `Snapshots` werden die Wellenfrontbilder definiert, die vom Solver zu bestimmten Zeiten herausgeschrieben werden. Dazu werden Anfang und Ende des in Frage kommenden Zeitbereichs sowie der zeitliche Abstand hintereinander folgender Schnappschüsse vorgegeben. Weiterhin kann der Raumbereich definiert werden, der abgebildet werden soll. Standardmäßig wird jeder Schnappschuss als dreidimensionaler Voxeldatensatz gespeichert, ähnlich wie bei der Röntgentomographie. Zusätzlich erfolgt eine zweidimensionale Abbildung entlang dreier frei zu definierender, senkrecht zueinander stehender Querschnittsflächen entlang der Koordinatenachsen des Modellgebietes. Die Lage dieser `slice planes` wird durch die zugehörigen Parameter der Rubrik festgelegt. Weiterhin kann definiert werden, welche Komponenten der Schallschnelle als Bild herausgeschrieben werden sollen. Zur Auswahl stehen  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$  sowie der Betrag des Schnellevektors ( $v_{abs}$ ). Verschiedene Beispiele solcher Wellenfrontschnappschüsse sind in Abb. 3 und 4 dargestellt.



**Abb. 3.** Wellenfrontbilder von vier isotropen Quellen in einem Bauteil mit einem (Bilder links) bzw. zwei zusätzlichen Streuern (Bilder rechts), die in das homogene Matrixmedium eingebettet sind (2D-Querschnitte).



**Abb. 4.** Wellenfrontbilder einer direkt am Spannkanal liegenden isotropen Quelle (2D-Querschnitte). Durch die räumliche Nähe der Grenzfläche entsteht neben der P-Welle auch eine stark ausgeprägte S-Welle, die um den Spannkanal gebeugt wird (aus [6]).

```
[Numerics]
cells_per_minimum_wavelength = 10
cubic_grid = off
forcegrid = off
force_deltax = 200.0e-06
force_deltay = 100.0e-06
force_deltaz = 200.0e-06
gbram = 12
```

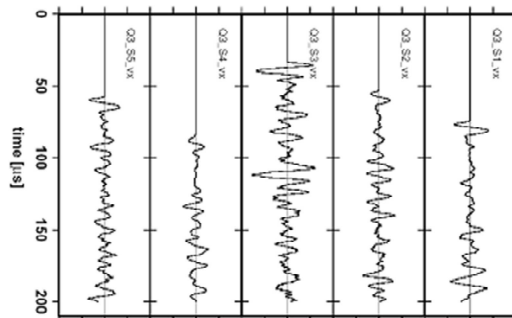
Der EFIT-Solver berechnet vollautomatisch das für die vorgegebenen Modellparameter notwendige numerische Raumzeitgitter, so dass sich der Nutzer darum in der Regel nicht selbst zu kümmern braucht. Für erfahrene Nutzer besteht aber die Möglichkeit, direkten Einfluss auf das Gitter und somit auch auf die Genauigkeit der Rechnung zu nehmen. Dies geschieht in der Rubrik `Numerics`. Dort lässt sich z.B. einstellen, wie viele Gitterzellen pro kleinster Wellenlänge realisiert werden sollen und ob ein exakt quadratisches Gitter verwendet werden soll oder nicht. Auch kann für jede Koordinatenachse separat eine bestimmte



Gitterweite erzwungen werden. Ferner lässt sich einstellen, welcher Teil des verfügbaren Hauptspeichers für die Rechnung maximal verwendet werden soll.

```
[Data_Output]
asciidata = on
individual_scale = off
logarithmic_gain = 1.0e+00
separate_ascans = off
```

In der letzten Rubrik `Data_Output` wird schließlich festgelegt, in welcher Form die Ergebnisse der numerischen Rechnungen herausgeschrieben werden sollen. Zur Auswahl steht neben einem binären auch ein ASCII-Rohdatenformat. Weiterhin wird festgelegt, ob die Wellenfrontschnappschüsse und Sensorsignale auf das globale Maximum der gesamten Simulation (Standard) oder auf das lokale Maximum des jeweiligen Bildes oder Zeitsignals normiert werden sollen. Ferner kann neben der meist verwendeten linearen Amplitudenskala auch eine logarithmische Skala verwendet werden (`logarithmic_gain > 1`). Darüber hinaus lässt sich festlegen, ob die Zeitsignale an den einzelnen Sensoren in einer einzigen Datei oder separat ausgegeben werden. Abb. 5 zeigt als Beispiel die Detektion eines SE-Ereignisses an fünf verschiedenen Sensorpositionen.



**Abb. 5.** Beispiele von berechneten Zeitsignalen eines SE-Ereignisses an fünf verschiedenen Sensorpositionen (aus [5]).

## 4. Die Ausgabedateien

*Numerical AE3D* erzeugt verschiedene Ausgabedateien, die im Folgenden erläutert werden.

### 4.1 Info-Datei

Die Info-Datei enthält eine vollständige Dokumentation der eingelesenen Modellparameter sowie der auf dieser Basis berechneten und verwendeten internen Programmparameter im ASCII-Textformat. In dieser Datei finden sich auch alle Informationen, die für eine korrekte Darstellung der Simulationsergebnisse mit externer Software benötigt werden (z.B. Anzahl der Pixel in den Wellenfrontbildern, Aspektverhältnisse, Normierungswerte etc.).

### 4.2 Modelldateien

Die vollständige Materialbelegung des numerischen Gitters wird als Voxeldatensatz gespeichert und kann zur Kontrolle und Visualisierung der konkreten Modellumsetzung verwendet werden. Zusätzlich werden auch die Materialbelegungen in den drei Schnittebenen herausgeschrieben, die in der `Snapshot`-Rubrik des Eingabeprotokolls durch die `slice_plane`-Einträge definiert wurden.

### 4.3 Wellenfrontschnappschüsse

In diesen Dateien wird die zuvor definierte Abfolge der Wellenfrontschnappschüsse für die festgelegten Schallschnellekomponenten herausgeschrieben. Auch hier wird standardmäßig ein vollständiger Voxeldatensatz pro Schnappschuss für eine 3D-Visualisierung gespeichert, ergänzt um die drei 2D-Querschnitte in den `slice_plane`-Ebenen. Zur besseren Visualisierung werden zusätzlich Konturmasken erzeugt, in denen nur die akustischen Materialübergänge im Modell gekennzeichnet werden und die sich wahlweise über die eigentlichen Wellenfrontbilder blenden lassen.

### 4.4 Zeitsignale

Sämtliche Zeitsignale an den in der Eingabedatei definierten Sensoren werden inklusive aller Vektorkomponenten der Schallschnelle abgespeichert, entweder in einer einzigen Datei oder in separaten Dateien pro Sensor. Diese Auswahl erfolgt in der `Data_Output`-Rubrik über den Schalter `separate_ascans`. Die numerischen Werte sind als doppelgenaue Gleitkommazahlen mit 8 Bytes (64 Bit) je Eintrag abgelegt und können als Rohdaten mit kommerzieller oder eigenentwickelter Software des Benutzers weiterverarbeitet werden.

## 5. Einschränkungen der Basisversion

Die frei zur Verfügung gestellte Basisversion des Solvers ist bereits äußerst leistungsfähig, weist aber eine Reihe von Einschränkungen auf, die bei Bedarf problemlos ergänzt werden können. Dazu gehören insbesondere

- die Erweiterung auf anisotrope oder viskoelastische Materialgesetze,
- die Erweiterung auf eine heterogene Matrix (z.B. Betonsieblinien, polykristalline Gefüge, Faserverbundwerkstoffe, partikuläre bzw. granulare Medien, poröse Materialien, Random Media etc.),
- die Ergänzung weiterer Formen von Anregungssignalen,
- die Ergänzung von offenen oder absorbierenden Randbedingungen an den Modellbegrenzungen,
- die Verbesserung der Diskretisierung von gekrümmten und schräg verlaufenden Grenzflächen im kartesischen EFIT-Gitter,
- die Erhöhung der Rechengeschwindigkeit durch CPU- und/oder GPU-Parallelisierung,
- die Bereitstellung einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI) zur Steuerung der Eingabedaten sowie zur Weiterverarbeitung und Visualisierung der Ausgabedaten.

## 6. Benutzung des Solvers und anwenderspezifische Weiterentwicklungen

Wer Interesse hat, den *Numerical AE3D*-Solver zu benutzen, sendet bitte eine E-Mail an den Autor mit einer kurzen Beschreibung der beabsichtigten Anwendung. Er bekommt dann ein Windows-64Bit-Executable, das Eingabeprotokoll sowie eine ausführliche Dokumentation der möglichen Funktionen und Anwendungen. Die Benutzung des Basis-Solvers ist für alle F&E-Arbeiten grundsätzlich frei, sofern die Verwendung und Herkunft des Programms in Berichten und Veröffentlichungen angemessen dargestellt wird. Kommerzielle Anwendungen sind hiervon ausgenommen. In solchen Fällen wird um vorherige Rücksprache gebeten.



Die freie Basisversion des Solvers kann bei Bedarf jederzeit durch kunden- und anwendungsspezifische Funktionen erweitert werden und ist in dieser Form dann auch für kommerzielle Anwendungen verwendbar. Eine solche Weiterentwicklung erfolgt üblicherweise im Rahmen von gemeinsamen F&E-Projekten und setzt immer auf der Basisversion auf, so dass sich der Entwicklungsaufwand in Grenzen hält.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Das in dieser Arbeit vorgestellte Simulationstool *Numerical AE3D* ist das erste frei zur Verfügung gestellte Programm der solverbasierten und anwendungsspezifischen Modulbibliothek *Numerical NDE*, die in den zurückliegenden 20 Jahren am Fraunhofer IKTS (vormals IZFP-D) in zahlreichen F&E-Projekten eingesetzt und weiterentwickelt wurde. In Zukunft sollen weitere Solver zu verschiedenen ZfP-Anwendungen bereitgestellt werden, u.a. zur Anwendung von geführten Wellen in Rohrleitungen und Platten, zur Impakt-Echo-Methode, zur Ultraschall-Tauchtechnik- und Phased Array-Prüfung sowie zur Schallfeldberechnung von Prüfköpfen. Mit den Simulationstools der *Numerical NDE*-Plattform können idealisierte Messdatensätze erzeugt und als Grundlage für Test, Validierung und Optimierung von bildgebenden Verfahren und Signalverarbeitungsalgorithmen verwendet werden. Außerdem können komplexe Wellenausbreitungsphänomene im Detail studiert und für didaktische Zwecke aufbereitet und visualisiert werden. Die Solver von *Numerical NDE* bestehen jeweils aus einer Windows-EXE mit frei editierbarer Texteingabedatei, die z.B. auch von einer externen GUI erzeugt und gesteuert werden kann. Die Programme generieren Rohdaten in Form von ASCII- oder Binärdateien, die von externer Software gelesen, weiterverarbeitet und visualisiert werden können. Die freie Basisversion der Solver kann bei Bedarf jederzeit durch kunden- und anwendungsspezifische Funktionen erweitert werden. Im Gegensatz zu anderen, heute verfügbaren kommerziellen Softwarelösungen setzt *Numerical NDE* auf separate hochspezialisierte, aber dennoch einfach zu bedienende sowie rasch und flexibel weiterentwickelnde Module, die durch ihre standardisierten Ein- und Ausgabeschnittstellen problemlos in kundeneigene Softwareumgebungen eingebettet werden können.

## Referenzen

- [1] P. Fellingner, R. Marklein, K.-J. Langenberg, S. Klaholz, "Numerical modeling of elastic wave propagation and scattering with EFIT- Elastodynamic Finite Integration Technique", *Wave Motion*, vol. 21, pp. 47-66, 1995.
- [2] R. Marklein, *Numerical Methods for the Modeling of Acoustic, Electromagnetic, Elastic and Piezoelectric Wave Propagation Problems in the Time Domain Based on the Finite Integration Technique*, Ph. D. Thesis, University of Kassel, Kassel, Germany, Shaker Verlag Aachen, Germany, 1997 (in German).
- [3] F. Schubert, *Propagation Characteristics of Ultrasonic Waves in Concrete and Conclusions for Non-Destructive Testing*, Ph. D. Thesis, Dresden University of Technology, Dresden, Germany, 2000 (in German).
- [4] F. Schubert, "Numerical time-domain modeling of linear and nonlinear ultrasonic wave propagation using finite integration techniques – Theory and applications", *Ultrasonics* 42, 221-229, 2004.
- [5] F. Schubert, B. Schechinger, "Numerical modeling of acoustic emission sources and wave propagation in concrete", *NDTnet*, vol. 7, no. 9, 2002, Online: <http://www.ndt.net/article/v07n09/07/07.htm>
- [6] F. Schubert, R. Marklein, "Numerical Computation of Ultrasonic Wave Propagation in Concrete using the Elastodynamic Finite Integration Technique (EFIT)", *IEEE Ultrasonics Symposium*, Munich, October 8-11, 2002. Article 5G-5, 778-783, on CD-ROM (2002).