

Animating Explosions

G.Yngve, J. O'Brien, J. Hodgins
SIGGRAPH 2000

vorgetragen von
Filip Sadlo, WS 2002

Einleitung

ï Explosion in Luft

- ñ Plötzliche Energiefreisetzung (mechanisch, chemisch, nuklear etc.)
- ñ sich ausbreitende Druckwelle
- ñ Wellenfront: starke Änderung in Druck, Dichte und Temperatur (Luft wird durch Kompression erhitzt)
- ñ Höhere Dichte in der Welle -> Überschallgeschwindigkeit und Lichtbrechung
- ñ Welle reflektiert, bricht, vereint sich wieder etc.

Animating Explosions

2

Einleitung

ï Visuelle Effekte

Zusätzlich zur Lichtbrechung:

- ñ häufig ein Zündblitz
- ñ Staubwolken durch Welle vom Boden aufgewirbelt
- ñ Bewegung von Objekten
- ñ Deformation und Bruch von Objekten
- ñ Feuerball aus heißen Gasen und Rauch -> weitere Verbrennungen oder Explosionen und Versengen umliegender Objekte

Animating Explosions

3

Motivation

ï Explosionen in der Unterhaltungsindustrie

- ñ Real 1:1
- ñ Real, verkleinert
- ñ Grafik-Techniken: heuristisch, analytisch, Testdaten

ï Probleme

- ñ Real 1:1 : Dramatisierung notwendig durch mehrfache Explosionen und Brennstoffe
- ñ Real, verkleinert: Verkleinerung der Physik
- ñ Grafik-Techniken: nur adäquat für Kugelwellen

Animating Explosions

4

Motivation

ï Vorteile physikalisch basierter Modelle

- ñ Können wiederholt und geändert werden bis sie gefallen
- ñ Rendering von der Simulation entkoppelt -> optische Eigenschaften der Staubwolken und Feuerbälle als post-process
- ñ Beliebige komplexe Szenarios mit interagierenden Explosionen und Objekten

Animating Explosions

5

Strömungsmodell

ï Physikalisch basiertes Modell

- ñ Modellierung des Zeitraums nach der Detonation als kompressible viskose Strömung
- ñ Lösen der Strömungsgleichungen mit einer Integrationsmethode, welche die extremen Schockwellen bewältigt
- ñ Interaktion zwischen Objekten und Fluid

Animating Explosions

6

Strömungsmodell

ï Physikalisch basiertes Modell (Forts.)

- ñ Druckwelle kann für Deformation und Bruch von Objekten verwendet werden
- ñ Definition der initialen Gestalt der Explosion und der Objekte durch polygonale Meshes
- ñ Steuerung der Eigenschaften durch wenige, physikalisch motivierte Parameter

Animating Explosions

7

Strömungsmodell

ï Euler-Darstellung

(Wert pro Raumeinheit und nicht pro Masseinheit)

ï Verbreitete Vereinfachungen

- ñ Keine Vibrationsenergie der Moleküle
- ñ Luft in chemischem Gleichgewicht
- ñ Keine Pyrolyse, keine Ionisation

ï Abweichungen

- ñ Vernachlässigbar unter 1000 K, klein bis 2500 K
- ñ Immer noch ästhetische Resultate bei 100000 K

Animating Explosions

8

Strömungsmodell

ii Gleichung I

Massenerhaltung: Änderung der Dichte gleich Fluss, über Randgebiet des Volumens

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \rho \underbrace{\nabla \cdot \mathbf{v}}_{\text{Divergenz}}$$

ρ : Dichte in kg/m³

\mathbf{v} : Geschwindigkeit in m/s

Strömungsmodell

ii Gleichung II

Navier-Stokes Gleichung: Impulserhaltung für Stokes-Fluid

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \rho \mathbf{f} - \nabla P + \frac{\mu}{3} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}) + \underbrace{\mu \nabla^2 \mathbf{v} - \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}}_{\text{konvektiver Term}}$$

ρ : Dichte in kg/m³

\mathbf{v} : Geschwindigkeit in m/s

\mathbf{f} : Körperkraft (Bsp. Gravitation) in N/kg

P : Druck in N/m²

μ : Viskosität

Strömungsmodell

ii Gleichung III

Energieerhaltung: Änderung der inneren Energie durch Wärmeleitung und Arbeit von Druck und Viskosität

$$\rho \frac{\partial N}{\partial t} = k \nabla^2 T - P \nabla \cdot \mathbf{v} + \Phi - \underbrace{\rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) N}_{\text{konvektiver Term}}$$

$$\Phi = -\frac{2\mu}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v})^2 + \frac{\mu}{2} \sum_{i,j \in \{x,y,z\}} \left(\frac{\partial v_i}{\partial j} + \frac{\partial v_j}{\partial i} \right)^2$$

ρ : Dichte in kg/m³

N : innere Energie in J k : Wärmeleitkoeffizient

T : Temperatur in K P : Druck in N/m² μ : Viskosität

Strömungsmodell

ii Zustandsgleichungen

Beziehung zwischen Energie, Temperatur, Dichte und Druck

$$N = c_v \rho T \quad P = \rho R T$$

c_v : spez. Wärmekapazität bei konstantem Volumen

R : Gaskonstante von Luft

ii Gespeicherte Größen

Wir speichern nur Dichte, Geschwindigkeit und innere Energie. Rest aus Zustandsgleichungen berechnet

Diskretisierung

1 Diskretisierung

- 1 Diskretisierung des Raumes in finite Voxel
- 2 Eigenschaften konstant innerhalb eines Voxels
- 3 Räumliche Ableitungen mittels zentraler Differenzen, Beispiel Druckgradient im Voxel [i,j,k]:

$$\frac{\partial P}{\partial x} \approx \frac{P_{[i+1,j,k]} - P_{[i-1,j,k]}}{2h} \quad h: \text{Voxelbreite}$$

- 4 Die 3 Strömungsgleichungen werden entsprechend diskretisiert

Numerische Integration

1 Expliziter Euler

- 1 Diskretisierte Strömungsgleichungen ergeben Update Regeln
- 2 Aber: steile Druckgradienten mit Überschallgeschwindigkeit -> rasche Divergenz (trotz explizitem statt implizitem Euler)

2 Expliziter Euler, Modifikation 1

- 1 Berechnung der Strömungsgleichungen II und III in zwei Schritten, zuerst nur zeitliche Anteile, danach die konvektiven Terme

Numerische Integration

1 Algorithmus

1. Näherung für Beschleunigung zum Zeitpunkt t, unter Benutzung der nicht konvektiven Terme von Gl. II:

$$\tilde{\mathbf{a}}_t = (\partial \mathbf{v} / \partial t),$$

2. Näherung für Geschwindigkeit nach Zeitschritt t: $\tilde{\mathbf{v}}_{t+\Delta t} = \mathbf{v}_t + \tilde{\mathbf{a}}_t \Delta t$ und Mittelwert während Zeitschritt t:

$$\bar{\mathbf{v}}_t = (\tilde{\mathbf{v}}_{t+\Delta t} + \mathbf{v}_t) / 2$$

3. Näherung für die Änderung der internen Energie, unter Benutzung der nicht konvektiven Terme von Gl. III und der mittleren Geschwindigkeit $\bar{\mathbf{v}}_t$

4. Berechne $\rho_{t+\Delta t}$ aus Gl. I und $\bar{\mathbf{v}}_t$

5. Berechne $\mathbf{v}_{t+\Delta t}$ und $N_{t+\Delta t}$ indem die Näherungen mit den konvektiven Termen aus Gl. II und III und $\rho_{t+\Delta t}$, $\bar{\mathbf{v}}_t$ ersetzt werden

6. Sekundäre Größen (Temperatur, ρ) aus Zustandsgleichungen

Numerische Integration

1 Donor-Acceptor Methode

- 1 Obwohl vorgestellter Algorithmus bereits stabiler, können scharfe Dichtegradienten immer noch kleine Flüsse aus fast leeren Voxeln bewirken -> negative Dichten
- 2 Deshalb Donor-Acceptor Methode zum Berechnen der konvektiven Terme in den Schritten 4 und 5
- 3 Diese Methode verschiebt Masse (und die Energie darin) proportional zur Masse des Donor- (oder Upstream-) Voxels

Numerische Integration

ii Donor-Acceptor Methode

ñ i aktueller Voxel, j einer seiner sechs Nachbarn, in Richtung \mathbf{d}

$$\rightarrow \bar{v}_{ij} = \frac{1}{2}(\bar{v}_i + \bar{v}_j) \cdot \mathbf{d} \quad (\text{Geschwindigkeit in Richtung } \mathbf{d})$$

ñ $\bar{v}_{ij} > 0$ -> Fluss von i nach j -> i ist donor und ρ_i f, r Berechnung der neuen Dichte von i benutzt

ñ $\bar{v}_{ij} < 0$ -> Fluss von j nach i -> j ist donor und ρ_j f, r Berechnung der neuen Dichte von i benutzt

ñ Massentransport zwischen j und i (d: donor):

$$\Delta m_{ji} = -\rho_d h^2 \bar{v}_{ij} \Delta t \quad \rightarrow \quad \Delta \rho_i = \frac{1}{h^3} \sum_j \Delta m_{ji} \quad (\text{Gleichung I})$$

ñ Limitierung falls zu grosser Zeitschritt?

Animating Explosions

17

Numerische Integration

ii Donor-Acceptor: konvektive Terme

Konvektion der inneren Energie (Gleichung III):

ñ Falls i acceptor: $N_{\Delta m_{ji}} = \Delta m_{ji} N_j$

ñ Falls j acceptor: $N_{\Delta m_{ji}} = 0$ (Mischung nur bei Zufluss)

ñ Aus i abtransportierte Masse: $\Delta m_{i-} = \sum_j \Delta m_{ij-}$

$$\Delta m_{ij-} = -\Delta m_{ji} \text{ falls i donor, sonst } \Delta m_{ij-} = 0$$

ñ Insgesamt Konvektion in Voxel i:

$$\Delta N_{C_i} = \frac{1}{\rho_{i+\Delta t} h^3} \left(\sum_j N_{\Delta m_{ji}} + N_i (\rho_i h^3 - \Delta m_{i-}) \right) - N_i$$

Animating Explosions

18

Numerische Integration

ii Donor-Acceptor: konvektive Terme

Konvektion der Geschwindigkeit (Gleichung II):

ñ Wie bei der Energie

ñ Mischung von vektoriellen Grössen anstatt skalarer

ñ Abnahme der kinetischen Energie muss als innere Energie angerechnet werden?

Animating Explosions

19

Randbedingungen

ii Free Boundaries

ñ Erlauben Austritt der Wellen aus dem Voxelblock (unendlicher Raum), dies erlaubt lange Simulationen

ii Hard Boundaries

ñ Relativgeschwindigkeiten senkrecht zum Mesh gleich Null, tangentiale Strömung unbeeinflusst

ii Free Boundaries als Optimierung

ñ Voxel mit kleinen lokalen Druckunterschieden werden free boundaries -> nie ausgewertet -> erspart die meisten Voxel

Animating Explosions

20

Anfangsbedingungen

Medium

- Benutzer wählt Temperatur und Druck der Luft, Beispiel: 290 K und 1 atm
- Restliche Größen aus Zustandsgleichungen

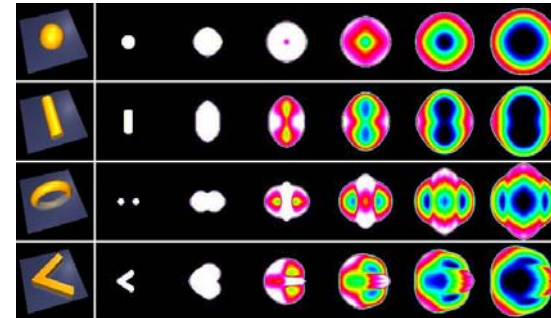
Detonation

- Definition einer Region mit höherer Temperatur oder Druck, zum Beispiel 2900 K und 1000 atm
- Kann auch zeitverzögert oder durch die Simulation selbst ausgelöst werden
- Initiale Detonation beliebig geformt (Mesh -> Voxels)

Animating Explosions

21

Anfangsbedingungen



Animating Explosions

22

Explosion by
Immobile Wall:
Cross-section of
Pressure

Shown at 1/33 speed

Interaktion mit Festkörpern

Fluid -> Festkörper

- Beispiel: Projektil durch Explosion beschleunigt

Festkörper -> Fluid

- Beispiel: Schockwelle, die das Projektil in der Luft hinterlässt wenn es mit Überschallgeschwindigkeit fliegt

2 Repräsentationen der Objekte

- Mesh: für Kräfte vom Fluid auf den Körper
- Voxels: für Verdrängung des Fluids durch den Körper

Animating Explosions

24

Interaktion mit Festkörpern

i Einbettung in Strömungsalgorithmus

1. Wende Kräfte vom Fluid auf den Körper an und berechne die neuen Körperbewegungen
2. Falls sich das Objekt mehr als einen Bruchteil eines Voxels bewegt hat, dann berechne die Voxelisierung des Objektes neu
3. Verdränge Fluid anhand der neuen Voxelrepräsentation des Objektes
4. Aktualisiere das Fluid mit Strömungsalgorithmus

Kopplung von Fluid auf Festkörper

i 2 Kräfteinflüsse vom Fluid auf Körper

- ñ Hydrostatischer Druck P: senkrecht zur Fläche
- ñ Flusskräfte: können aufgespalten werden in Anteile senkrecht und tangential zur Fläche, tangentialer Anteil wird vernachlässigt, da bei Explosionen viel kleiner als Kräfte durch P

Kopplung von Fluid auf Festkörper

i Methode

- ñ Annahme: Objekt ist im Gleichgewicht unter Umgebungsdruck
- ñ Umgebungsdruck \bar{P} : P - Umgebungsdruck

- ñ Normalkraft pro Flächeneinheit (dynamischer Umgebungsdruck):

$$\bar{P}_{dyn} = \bar{P} + \frac{1}{2} \rho (\mathbf{v}_{rel} \cdot \mathbf{n})^2 \quad (\text{Umgebungsdruck plus verlorene } E_{kin} / Vol)$$

\mathbf{v}_{rel} : Geschwindigkeit des Fluids relativ zur Fläche

\mathbf{n} : nach aussen gerichtete Flächennormale

-> Kraft auf Dreieck des mesh, unter Annahme geringend kleiner Fläche A sodass Kraft innerhalb konstant:

$$\mathbf{f} = -\mathbf{n} A \bar{P}_{dyn}$$

Kopplung von Fluid auf Festkörper

i Methode (Forts.)

- ñ Eigenschaften des Fluids werden im Massenzentrum des Dreiecks gemessen
- ñ Für alle Dreiecke wird die Kraft berechnet und damit die Körperbewegung aktualisiert
- ñ Die Kräfte können auch auf Körper angewendet werden, welche deformieren oder brechen (-> Finite Elemente)

Kopplung von Fluid auf Festkörper



29

Kopplung von Festkörper auf Fluid

Methoden

- Mesh-Objekt -> Voxels
- Voxels -> dynamische Hard boundaries für Fluid
- Problem: Mesh bewegt sich kontinuierlich, Voxelrepräsentation ist aber diskret -> Sprünge
- Lösung: Verdrängung des Fluids nicht sofort, sondern gleichmäßig über einen Zeitraum
- > Voxelisierung liefert partielle Volumen zwischen 0 und 1, entsprechend dem Anteil des Voxels, der nicht innerhalb eines Objekts liegt (Voxel-Volumen bezogen auf Fluid)

Animating Explosions

30

Kopplung von Festkörper auf Fluid

Methoden (Forts.)

- Voxel mit Volumen 0 ergeben Hard boundaries
- Objekte, die in einer Richtung dünner sind als ein Voxel, haben nur partielle Volumen und bilden deshalb keine Hard boundaries -> Fluss durch Objekt hindurch
- Setze Partielle Volumen nahe bei 0 auf 0 (Stabilität)
- Anpassung der Donor-Acceptor Methode auf partielle Volumen, da nebeneinander liegende Voxel verschiedene Volumen haben können

Animating Explosions

31

Kopplung von Festkörper auf Fluid

Methoden (Forts.)

- Bewegt sich ein Teil des Objektes mehr als einen Voxel über ein Objekt wird neu voxelisiert und Hard boundaries werden aktualisiert
- > Änderung des partiellen Volumens der Voxel -> Fluss durch Verdrängung
- Dieser Fluss soll kontinuierlich geschehen -> Energie- und Massenerhaltung auf längere Zeit hinaus, anstatt sofort
- > Interne partielle Volumen: anstatt der grossen Schritte der partiellen Volumen, werden interne, kleine Schritte auf das Fluid angewendet

Animating Explosions

32

Kopplung von Festkörper auf Fluid

Interne Partielle Volumen

- ñ Gesucht: kontinuierliche Änderung des partiellen Voxel-Volumens von V_1 auf V_2
- ñ Modellierung der Kompression des Voxels durch das Objekt als Kolben der entlang der Achse der gr̂ssten Geschwindigkeitskomponente v_p des Objekts den Voxel komprimiert
- ñ Weg des Kolbens nach t Sekunden sowie Änderung des partiellen Volumens:

$$l = v_p t, \quad \Delta V = V_2 - V_1 = h^2 v_p t$$
- ñ Bewegung linear mit v_p , über einen Zeitraum von $t = \frac{\Delta V}{h^2 v_p}$

Animating Explosions

33

Kopplung von Festkörper auf Fluid

Interne Partielle Volumen

- ñ Die internen partiellen Volumenänderungen bewirken Änderung in Druck, Dichte und Temperatur
- ñ Neue Dichte gehorcht $\rho_1 V_1 = \rho_2 V_2$ (Massenerhaltung)
- ñ Druck und Temperatur gehorchen $\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^\gamma = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\gamma/(\gamma-1)}$ mit $\gamma = 1 + R/c_v$ (Rest aus Zustandsgleichungen)
- ñ Strömungsgleichungen bewirken lokalen Fluss aufgrund der Änderungen

Animating Explosions

34

Kopplung von Festkörper auf Fluid

Interne Partielle Volumen

- ñ Wenn partielles Volumen von einem nicht-null Wert auf einen anderen wechselt, ist alles in Ordnung
- ñ Wenn aber das partielle Volumen von Null auf nicht-null wechselt (oder umgekehrt) -> Spezialfall: Voxel zusammen mit einem Nachbarn als eigener, nicht-null Voxel behandelt
- ñ Wahl des Nachbarn: aufgrund v_p , der gr̂ssten Geschwindigkeitskomponente des Objekts

Animating Explosions

35

Kopplung von Festkörper auf Fluid

Interne Partielle Volumen: Split

Berechne interne partielle Volumen der beteiligten Voxel A und B als \tilde{V}_{A1} und \tilde{V}_{B1}

- ñ Falls V_{A1} (ursprüngliches partielles Volumen von A) gleich Null und V_{A2} (neues partielles Volumen von A) ungleich Null
- ñ Wähle initiale Volumen \tilde{V}_{A1} und \tilde{V}_{B1} so, dass $\tilde{V}_{A1} + \tilde{V}_{B1} = V_{B1}$ (Volumenerhaltung) und $\frac{\tilde{V}_{A1}}{V_{A2}} = \frac{\tilde{V}_{B1}}{V_{B2}}$ (als ein Voxel)

$$\rightarrow \Delta V_A = V_{A2} - \tilde{V}_{A1} = V_{A2} - V_{A2} \frac{V_{B1}}{V_{A2} + V_{B2}}$$

$$\rightarrow \Delta V_B = V_{B2} - \tilde{V}_{B1} = V_{B2} - V_{B2} \frac{V_{B1}}{V_{A2} + V_{B2}}$$

Animating Explosions

36

Kopplung von Festkörper auf Fluid

Interne Partielle Volumen: Join

Falls V_{A1} (ursprüngliches partielles Volumen von A) ungleich Null und V_{A2} (neues partielles Volumen von A) gleich Null

Wichtige initiale Volumen:

$$\tilde{V}_{A1} = 0,$$

\tilde{V}_{B1} als zusammengefassten Voxel (Eigenschaften von A und B werden gemittelt, verlorene kinetische Energie -> innere Energie)

$$\rightarrow \Delta V_B = V_{B2} - \tilde{V}_{B1} = V_{B2} - \frac{\rho_A V_{A1} + \rho_B V_{B1}}{\rho_B}$$

(aus Massenerhaltung: $\rho_B \tilde{V}_{B1} = \rho_A V_{A1} + \rho_B V_{B1}$)

Fluid <-> Festkörper

Projectile Propelled
Out of Chamber

Shown at 1/16 speed

Sekundäre Effekte

Einleitung

Lichtbrechung, Feuerball, Staubwolken

Beeinflussen die Simulation nicht -> als post-process

Lichtbrechung

Welle ist dichter -> höherer Brechungsindex

Realisation: ray-tracing durch das Fluid-Volumen:

Auf dem Weg des Strahls durch das Fluid wird Dichte trilinear interpoliert und Brechungsindex berechnet. Ändert sich dieser mehr als ein Schwellenwert, wird neue Strahlrichtung berechnet, wobei Dichtegradient als Flächennormale dient.

Lichtbrechung

Replay of Fireball:
Refraction from
Blast Wave

Shown at 1/10 speed

Feuerball

Methodik

- Annahme: Material aus dem Inneren der Explosion
- > masselose Partikel werden im initialen Bereich der Explosion positioniert und vom Fluid bewegt
- Strömungsmodell liefert bereits für Feuerball wichtige Temperaturprofile
- Temperatur der Partikel wird aus Fluid interpoliert
- Partikel werden als Gauss-Blobs gerendert (Rot, Grün, Blau, Opazität), Farbe aus Strahlungsgesetz schwarzer Körper
- Vernachlässigung sekundärer Verbrennungen bzw. radioaktiver Strahlung

Animating Explosions

41

Feuerball



42

Staubwolken

Einleitung

- Druckwelle wirbelt Staub auf Oberflächen auf
- Schwer zu analysieren -> Aufwirbelungskoeffizient vom Benutzer definiert
- Einmal in der Luft, hängt der Weg des Partikels vor allem von seiner Größe ab:
 - Je kleiner desto mehr regieren Strömungskräfte
 - Je größer desto mehr regieren Trägheitskräfte
 - Kleinere Partikel haben kleinere Endgeschwindigkeiten und weisen stärkere Brownsche Bewegung auf

Animating Explosions

43

Staubwolken

Rendering

- Als Metapartikel, jeder definiert eine homogene Gauß'sche Dichteverteilung von Partikeln
- Größe der Partikel aus experimentellen Daten
- Metapartikel reisen durch das Fluid als ob sie nur aus einem Partikel in ihrem Zentrum beständen
- Varianzen der Dichteverteilungen wachsen, entsprechend der Brownschen Diffusion pro Zeiteinheit

Animating Explosions

44

Staubwolken

Explosion Amidst Buildings

Ground view

45

Resultate

Example (figure)	h (m)	Δt (ms)	t_{tot} (ms)	V_0 (m ³)	P_0 (atm)	T_0 (K)
projectile (1)	1.0	0.10	450	73.60	1000	2900
barrier (2)	0.2	0.01	25	0.52	1000	2900
shapes (5)	1.0	0.10	30	1000.00	1000	2900
fracture (6,7)	0.2	0.02	20	0.52	1000	2900
fireball (8,9)	1.0	0.10	1000	65.40	1000	2900
corner (10)	1.0	0.10	10000	268.08	1000	2900
city (11)	1.0	0.10	5000	65.40	1000	2900
nuclear (12)	50.0	0.50	30000	9.1×10^7	345	1×10^5

Table 1: Parameters for simulations: voxel width, timestep, total simulation time, and initial volume, pressure, and temperature of detonation.

Berechnungszeit auf 195MHz R10K, Volumen: 101x101x101:

- Pro Zeitschritt Δt : einige Sekunden bis 2 Minuten
- > gesamte Simulation: einige Stunden bis einige Tage

Animating Explosions

46

Diskussion

• Mögliche Verbesserungen

- Explizite Integration notwendig wegen hoher Druckunterschiede in der Welle -> kleine Zeitschritte
- > Nachdem Welle das Medium verlassen hat, könnte man implizit integrieren -> größere Zeitschritte
- Modellierung von Rauch
- Staub bei Zerschellen von Objekten
- Schockwellen auch in anderen Medien z.B. Festkörper
- Meteorologische Effekte
- Dramatisierung der Feuerball-Welle durch mehr Partikel
- Zugabe von Rauschen in Geschwindigkeit und Partikelpositionen als post-process

Animating Explosions

47

Animationen

Explosion in a Hallway

48

Animationen

**Large-Scale
High-Temperature
Explosion**

Shown at 2x speed

49

Animationen

**Window Shattered
by Explosion**

Shown at 1/5 speed

50

Ende