

Animating Explosions

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

vorgetragen von
Filip Sadlo, WS 2002

Einleitung

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

Animating Explosions

2

Einleitung

- **Visuelle Effekte**

Zusätzlich zur Lichtbrechung:

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

Animating Explosions

3

Motivation

- **Explosionen in der Unterhaltungsindustrie**
 - Real 1:1
 - Real, verkleinert
 - Grafik-Techniken: heuristisch, analytisch, Testdaten
- **Probleme**
 - Real 1:1 : Dramatisierung notwendig durch mehrfache Explosionen und Brennstoffe
 - Real, verkleinert: „Verkleinerung der Physik“
 - Grafik-Techniken: nur adäquat für Kugelwellen

Animating Explosions

4

Motivation

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

Animating Explosions

5

Strömungsmodell

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

Animating Explosions

6

Strömungsmodell

- **Physikalisch basiertes Modell (Forts.)**
 - Druckwelle kann für Deformation und Bruch von Objekten verwendet werden
 - Definition der initialen Gestalt der Explosion und der Objekte durch polygonale Meshes
 - Steuerung der Eigenschaften durch wenige, physikalisch motivierte Parameter

Animating Explosions

7

Strömungsmodell

- **Euler-Darstellung**
(Wert pro Raumeinheit und nicht pro Masseinheit)
- **Verbreitete Vereinfachungen**
 - Keine Vibrationsenergie der Moleküle
 - Luft in chemischem Gleichgewicht
 - Keine Pyrolyse, keine Ionisation
- **Abweichungen**
 - Vernachlässigbar unter 1000 K; klein bis 2500 K
 - Immer noch ästhetische Resultate bei 100000 K

Animating Explosions

8

Strömungsmodell

- Gleichung I

Massenerhaltung: Änderung der Dichte gleich Fluss über Randgebiet des Volumens

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

ρ : Dichte in kg/m³

\mathbf{v} : Geschwindigkeit in m/s

Strömungsmodell

- Gleichung II

Navier-Stokes Gleichung: Impulserhaltung für Stokes-Fluid

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

ρ : Dichte in kg/m³

\mathbf{v} : Geschwindigkeit in m/s

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

P : Druck in N/m²

μ : Viskosität

Strömungsmodell

- Gleichung III

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

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

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

ρ : Dichte in kg/m³

N : innere Energie in J

T : Temperatur in K

k : Wärmeleitungskoeffizient

P : Druck in N/m²

μ : Viskosität

Strömungsmodell

- 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

- Gespeicherte Größen

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

Diskretisierung

- Diskretisierung

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

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

- Die 3 Strömungsgleichungen werden entsprechend diskretisiert

Animating Explosions

13

Numerische Integration

- Expliziter Euler

- Diskretisierte Strömungsgleichungen ergeben „update Regeln“
- Aber: steile Druckgradienten mit Überschallgeschwindigkeit -> rasche Divergenz (trotz explizitem statt implizitem Euler)

- Expliziter Euler, Modifikation 1

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

Animating Explosions

14

Numerische Integration

- Algorithmus

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

$$\tilde{\mathbf{a}}_i = (\partial \mathbf{v} / \partial t)_i$$
2. Näherung für Geschwindigkeit nach Zeitschritt: $\tilde{\mathbf{v}}_{i+\Delta t} = \mathbf{v}_i + \tilde{\mathbf{a}}_i \Delta t$ und Mittelwert während Zeitschritt:

$$\bar{\mathbf{v}}_i = (\tilde{\mathbf{v}}_{i+\Delta t} + \mathbf{v}_i) / 2$$
3. Näherung für die Änderung der internen Energie, unter Benutzung der nicht konvektiven Terme von Gl. III und der mittleren Geschwindigkeit $\bar{\mathbf{v}}_i$.
4. Berechne $\rho_{i+\Delta t}$ aus Gl. I und $\bar{\mathbf{v}}_i$.
5. Berechne $\mathbf{v}_{i+\Delta t}$ und $N_{i+\Delta t}$ indem die Näherungen mit den konvektiven Termen aus Gl. II und III und $\rho_{i+\Delta t}$, $\bar{\mathbf{v}}_i$ ergänzt werden
6. Sekundäre Größen (Temperatur, ...) aus Zustandsgleichungen

$$\frac{\partial N}{\partial t} = [K \nabla^2 T - \rho \nabla \cdot \mathbf{v} + Q] - \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) N$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v}$$

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

Animating Explosions

15

Numerische Integration

- Donor-Acceptor Methode

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

Animating Explosions

16

Numerische Integration

• Donor-Acceptor Methode

- i aktueller Voxel, j einer seiner sechs Nachbarn, in Richtung \mathbf{d}
 $\rightarrow \bar{v}_j = \frac{1}{2}(\bar{v}_i + \bar{v}_j) \bullet \mathbf{d}$ (Geschwindigkeit in Richtung \mathbf{d})
- $\bar{v}_j > 0 \rightarrow$ Fluss von i nach j \rightarrow i ist donor und ρ_j für Berechnung der neuen Dichte von i benutzt
- $\bar{v}_j < 0 \rightarrow$ Fluss von j nach i \rightarrow j ist donor und ρ_j für Berechnung der neuen Dichte von i benutzt
- Massentransport zwischen j und i (d: donor):
 $\Delta m_{ji} = -\rho_j h^2 \bar{v}_j \Delta t \rightarrow \Delta \rho_i = \frac{1}{h^3} \sum_j \Delta m_{ji}$ (Gleichung I)
- Limitierung falls zu grosser Zeitschritt?

Animating Explosions

17

Numerische Integration

• Donor-Acceptor: konvektive Terme

- Konvektion der Geschwindigkeit (Gleichung II):
- Wie bei der Energie
- Mischung von vektoriellen Grössen anstatt skalarer
- Abnahme der kinetischen Energie muss als innere Energie angerechnet werden?

Animating Explosions

19

Numerische Integration

• Donor-Acceptor: konvektive Terme

- Konvektion der inneren Energie (Gleichung III):
- Falls i acceptor: $N_{\Delta m_{ji}} = \Delta m_{ji} N_j$
- Falls j acceptor: $N_{\Delta m_{ji}} = 0$ (Mischung nur bei Zufluss)
- Aus i abtransportierte Masse: $\Delta m_{i-} = \sum_j \Delta m_{ji-}$
 $\Delta m_{ji-} = -\Delta m_{ji}$ falls i donor, sonst $\Delta m_{ji-} = 0$
- Insgesamt Konvektion in Voxel i:

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

Animating Explosions

18

Randbedingungen

• Free Boundaries

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

• Hard Boundaries

- Relativgeschwindigkeiten senkrecht zum Mesh gleich Null, tangentielle Strömung unbeeinflusst

• Free Boundaries als Optimierung

- Voxel mit kleinen lokalen Druckunterschieden werden free boundaries \rightarrow nie ausgewertet \rightarrow erspart die meisten Voxel

Animating Explosions

20

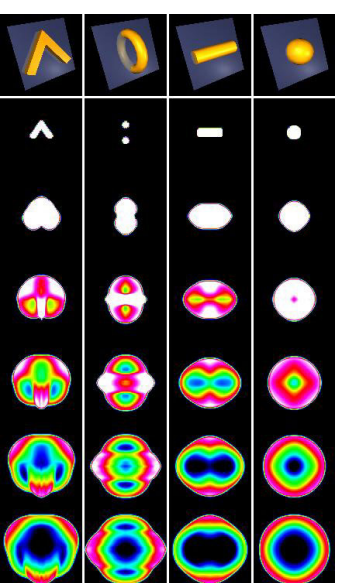
Anfangsbedingungen

- **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

- **Einbettung in Strömungsalgorithmus**
 1. Wende Kräfte vom Fluid auf den Körper an und berechne die neuen Starrkörperbewegungen
 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

Animating Explosions

25

Kopplung von Fluid auf Festkörper

- **2 Kräfteinflüsse vom Fluid auf Körper**
 - Hydrostatischer Druck P: senkrecht zur Fläche
 - Fluskräfte: können aufgespalten werden in Anteile senkrecht und tangential zur Fläche, tangentialer Anteil wird vernachlässigt, da bei Explosionen viel kleiner als Kräfte durch P

Animating Explosions

26

Kopplung von Fluid auf Festkörper

- **Methode**
 - Annahme: Objekt ist im Gleichgewicht unter Umgebungsdruck
 - Überdruck \bar{P} : P - Umgebungsdruck
 - Normalkraft pro Flächeneinheit (dynamischer Überdruck):
$$\bar{P}_{dyn} = \bar{P} + \frac{1}{2} \rho (\mathbf{v}_{rel} \bullet \hat{\mathbf{n}})^2$$
 (Überdruck plus verlorene $E_{kin,UL} / Vol$)
 - \mathbf{v}_{rel} : Geschwindigkeit des Fluids relativ zur Fläche
 - $\hat{\mathbf{n}}$: nach aussen gerichtete Flächennormale
 - > Kraft auf Dreieck des mesh, unter Annahme genügend kleiner Fläche A sodass Kraft innerhalb konstant:
$$\mathbf{f} = -\hat{\mathbf{n}} A \bar{P}_{dyn}$$

Animating Explosions

27

Kopplung von Fluid auf Festkörper

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

Animating Explosions

28

Kopplung von Fluid auf Festkörper



29

Kopplung von Festkörper auf Fluid

- Methode (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

- Methode
 - 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
 - > Voxelsierung liefert partielle Volumen zwischen 0 und 1, entsprechend dem Anteil des Voxels, der nicht innerhalb eines Objekts liegt (Voxel-Volumen bezüglich Fluid)

Animating Explosions

30

Kopplung von Festkörper auf Fluid

- Methode (Forts.)
 - Bewegt sich ein Teil des Objektes mehr als einen Voxel -> 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

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

$$l = v_p t, \quad \Delta V = V_2 - V_1 = h^2 v_p t$$
- 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

- Wenn partielles Volumen von einem nicht-null Wert auf einen anderen wechselt, ist alles in Ordnung
- 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
- Wahl des Nachbarn: aufgrund v_p , der grössten Geschwindigkeitskomponente des Objekts

Animating Explosions

35

Kopplung von Festkörper auf Fluid

• Interne Partielle Volumen

- Die internen partiellen Volumenänderungen bewirken Änderung in Druck, Dichte und Temperatur
- Neue Dichte gehorcht $\rho_1 V_1 = \rho_2 V_2$ (Massenerhaltung)
- 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 $\gamma = 1 + R / c_p$ (Rest aus Zustandsgleichungen)
- Strömungsgleichungen bewirken lokalen Fluss aufgrund der Änderungen

Animating Explosions

34

Kopplung von Festkörper auf Fluid

• Interne Partielle Volumen: Split

- Berechne interne partielle Volumen der beteiligten Voxel A und B als V_{A1} und V_{B1}
- Falls V_{A1} (ursprüngliches partielles Volumen von A) gleich Null und V_{A2} (neues partielles Volumen von A) ungleich Null
 - 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

- Wähle 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: $\rho_B \tilde{V}_{B1} = \rho_A V_{A1} + \rho_B V_{B1}$)

Animating Explosions

37

Sekundäre Effekte

- Einleitung

- Lichtbrechung, Feuerbälle, 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.

Animating Explosions

39

Fluid <-> Festkörper

Projectile Propelled
Out of Chamber

Shown at 1/16 speed

38

Lichtbrechung

Replay of Fireball:
Refraction from
Blast Wave

Shown at 1/10 speed

40

Feuerbälle

- Methode
 - Annahme: Material aus dem Inneren der Explosion
 - massenlose Partikel werden im initialen Bereich der Explosion positioniert und vom Fluid bewegt
 - Strömungsmodell liefert bereits für Feuerbälle wichtige Temperaturphänomene
 - 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

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 Zerbrechern von Objekten
 - Schockwellen auch in anderen Medien z.B. Festkörper
 - Meteorologische Effekte
 - Dramatisierung der Feuerbälle durch mehr Partikel
 - Zugabe von Rauschen in Geschwindigkeit und Partikelpositionen als post-process

Animating Explosions

47

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
chv (11)	1.0	0.10	5000	65.40	1000	2900
nuclear (12)	50.0	0.50	30000	9.1×10^7	345	1×10^8

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

Berechnungszeit auf 195MHz R10K, Volumen: $10^8 \times 10^8 \times 10^8$:

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

Animating Explosions

46

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