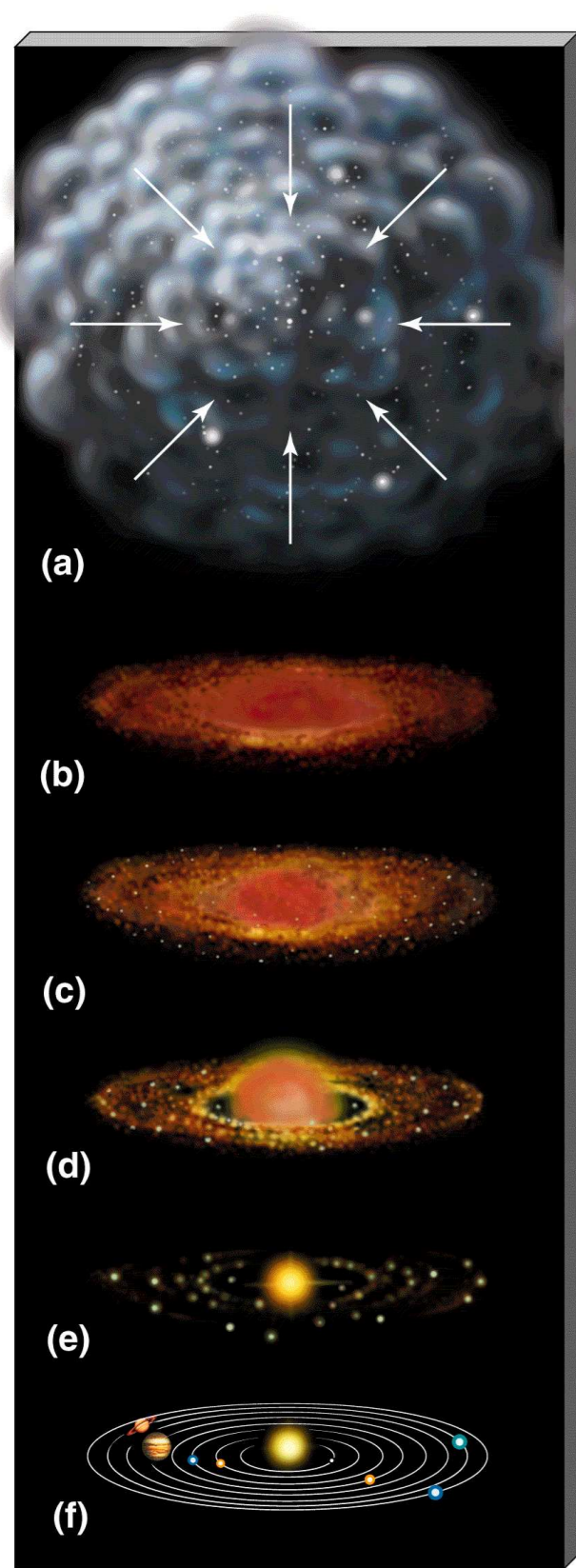




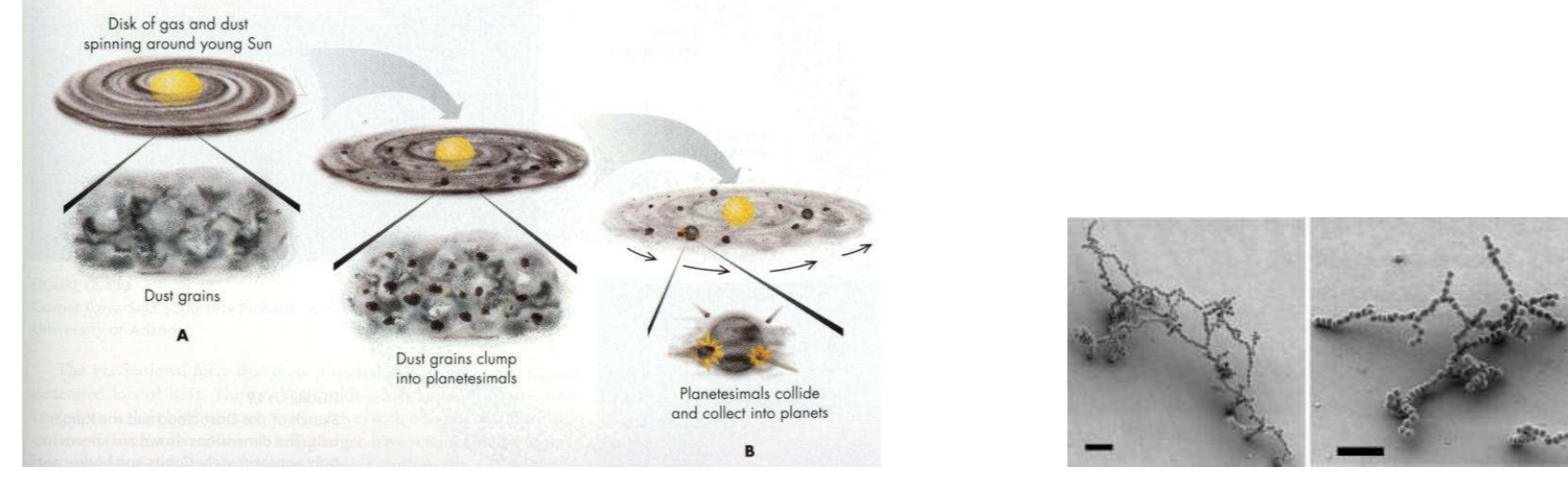
Planetentstehung



Eine interstellare Molekülwolke kollabiert (a) zum Stern, der von einer Staubscheibe umgeben ist (b). Der Staub klumpt zu Planetesimalen von wenigen Kilometern Durchmesser zusammen (c). Die Planetesimale akkretieren den restlichen Staub durch ihre Anziehungskraft und wachsen zu Proto-Planeten heran (c-e). Die Proto-Planeten wachsen weiter durch gegenseitige Kollision und regulieren ihre Orbits (f).

Planetesimalentstehung

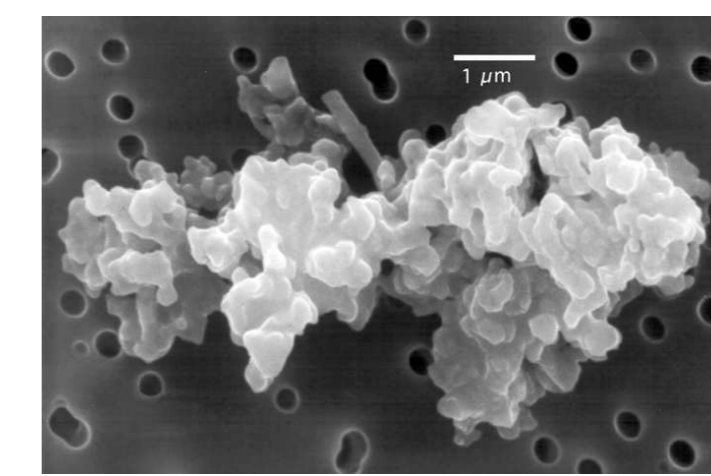
In zwei Schritten:



- Vom Staub (μm -Größe) zu Prä-Planetesimalen (dm-Größe): Fraktale Staubketten verklumpen durch Hit-and-Stick (van-der-Waals-Kräfte).
- Von Prä-Planetesimalen zu Planetesimalen (km-Größe): Der Wachstumsmechanismus ist unklar, denn van-der-Waals-Kräfte besitzen auf dieser Größenskala kaum Wirkung und Anziehungskräfte sind noch zu schwach.
 - **Gravitative Instabilität?** (Besonders dichte Schichten der Scheibe kollabieren zu Objekten von km-Größe.) Problem: Scheibe zu turbulent?
 - **Wachstum durch Kollision?**

Prä-Planetesimal-Wachstum durch Kollision

Poröse Staubagglomerate kollidieren und bleiben evtl. haften. Kinetische Energie wird während der Kollision durch Kompaktierung dissipiert.



Das Resultat einer Kollision hängt von der Geschwindigkeit, dem Einschlagwinkel, den Objektgrößen und – vor allem – den Materialeigenschaften ab.

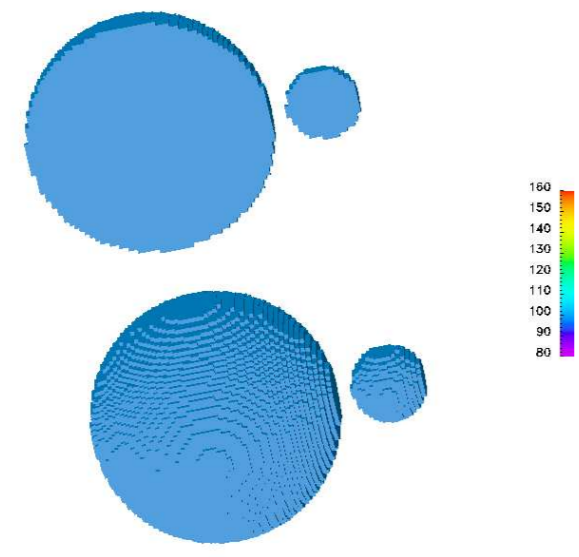
Problem: Mögliche Fragmentierung und Zerstörung, aber kein Nettowachstum?

Experimente sind in dieser Größenordnung nicht durchführbar \Rightarrow numerische Simulationen sind notwendig.

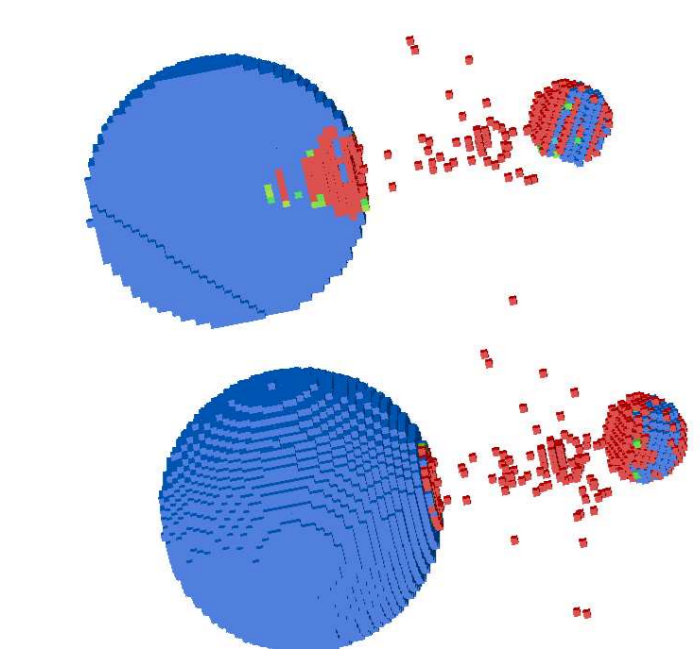
Einschlagsimulationen

Bedeutung der Art des Materials:

Identische Anfangsbedingungen, Einschlag eines Projektils in ein großes Target mit 20 m/s.

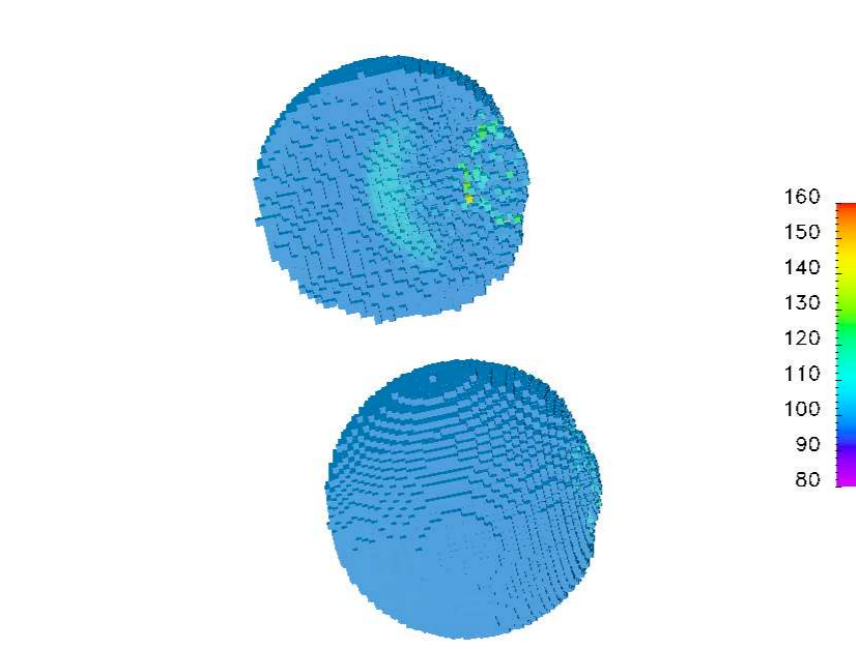


Brüchiger Fels:



(Farbskala: Schaden)
 \Rightarrow Fragmentierung

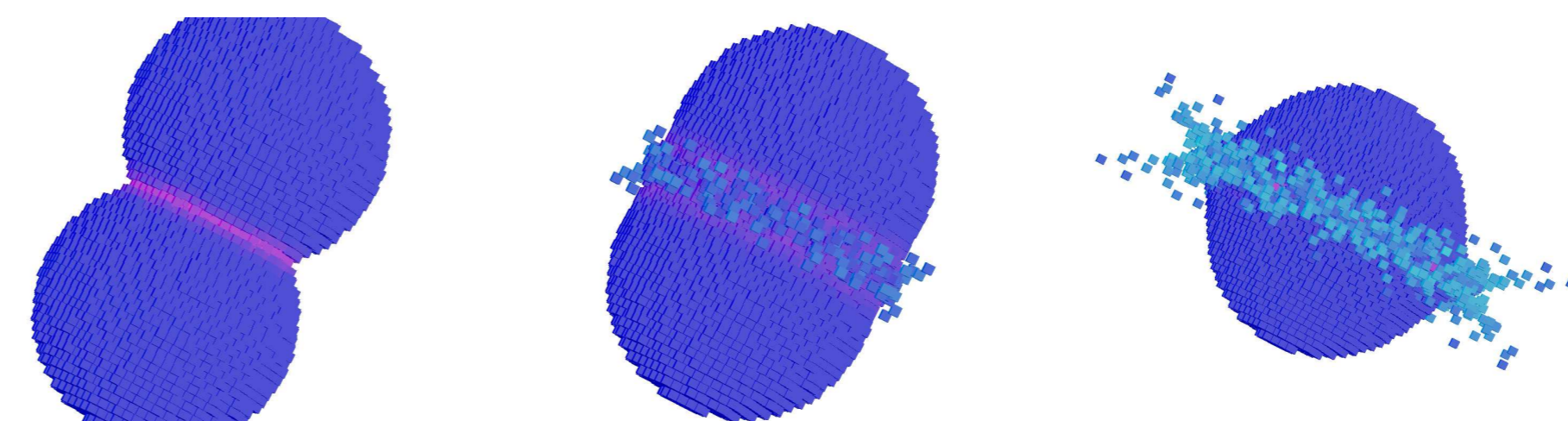
Poröse Objekte:



(Farbskala: Dichte)
 \Rightarrow Haften

Numerische Methode: **Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)** modifiziert für Kontinuumsmechanik.

Typische Einschlagsequenz:

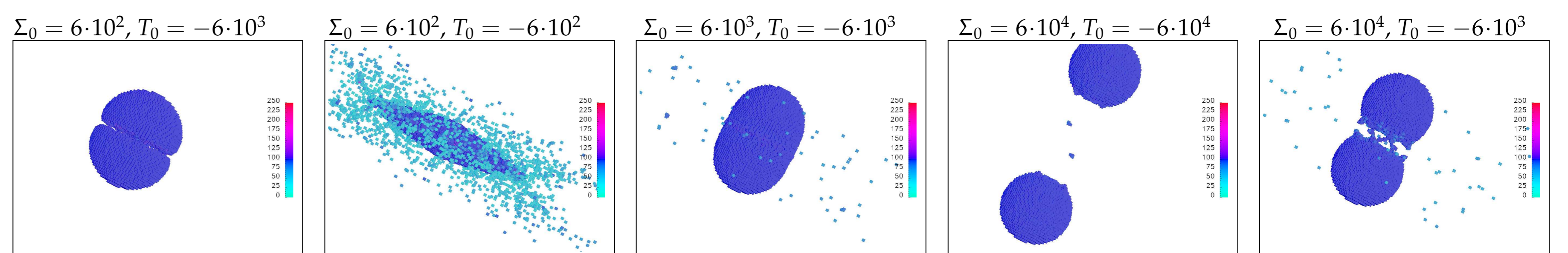


Zwei poröse Körper gleicher Größe (Radius: 1 m) kollidieren mit 10 m/s.

Einfluss der Materialparameter auf das Endresultat:

Poröses Material, Füllfaktor: 0.1, gleich große Targets (Radius: 1 m), frontaler Einschlag mit 10 m/s. Kompressionsfestigkeit: $\Sigma(\rho) = \Sigma_0(\rho/\rho_0)^6$

Zugfestigkeit: $T(\rho) = T_0(\rho/\rho_0)^5$

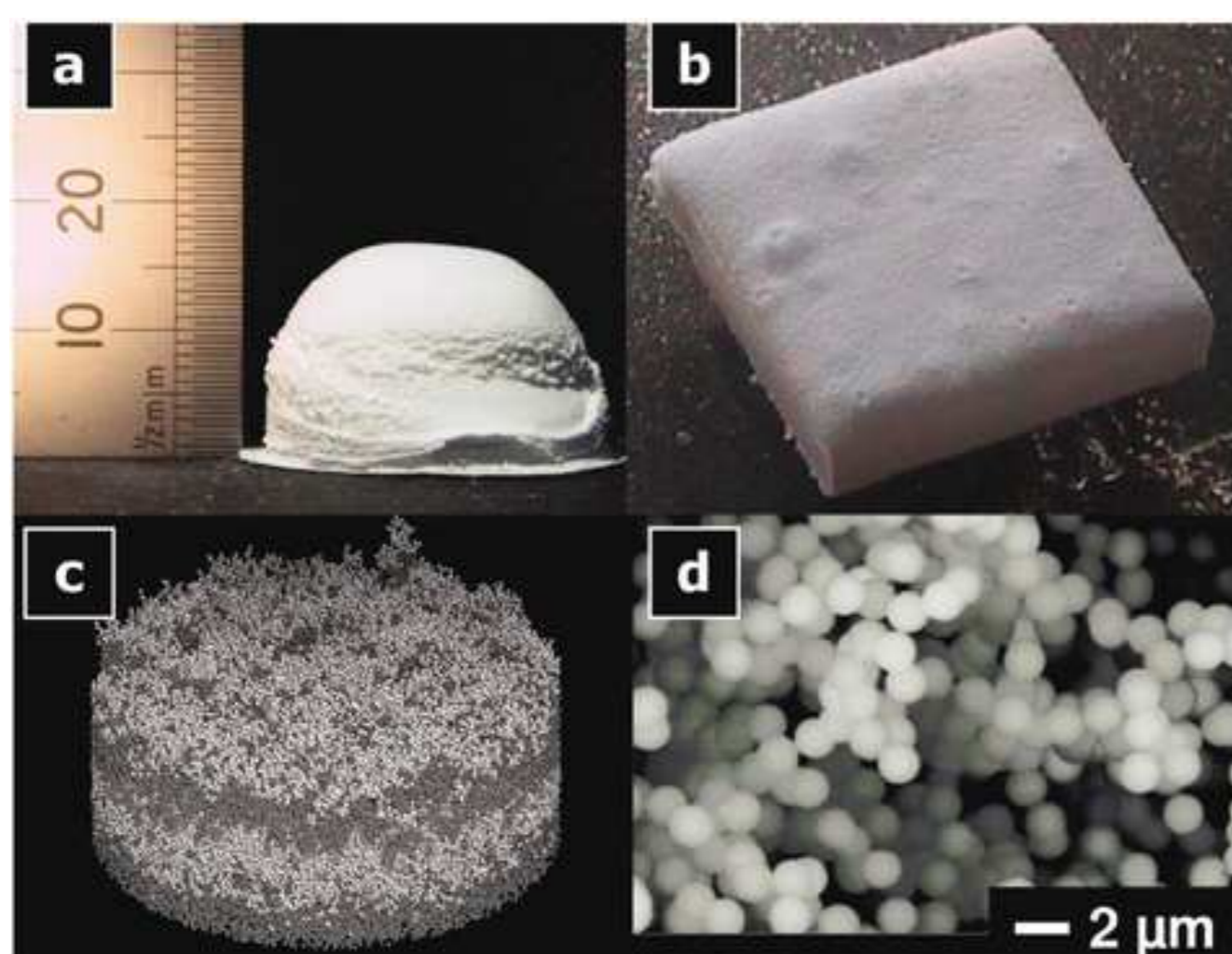


(Alle Parameter sind in Pa angegeben.)

\Rightarrow Eine geringe Veränderung der Materialparameter führt zu jeglichem Resultat, von Deformation zu vollständiger Zerstörung, Haften oder auch (elastischem) Abprallen.

Kalibrierung des Codes und experimentelle Ergebnisse

Für verlässliche Simulationsergebnisse müssen die Materialparameter anhand von Messergebnissen sorgfältig kalibriert werden.

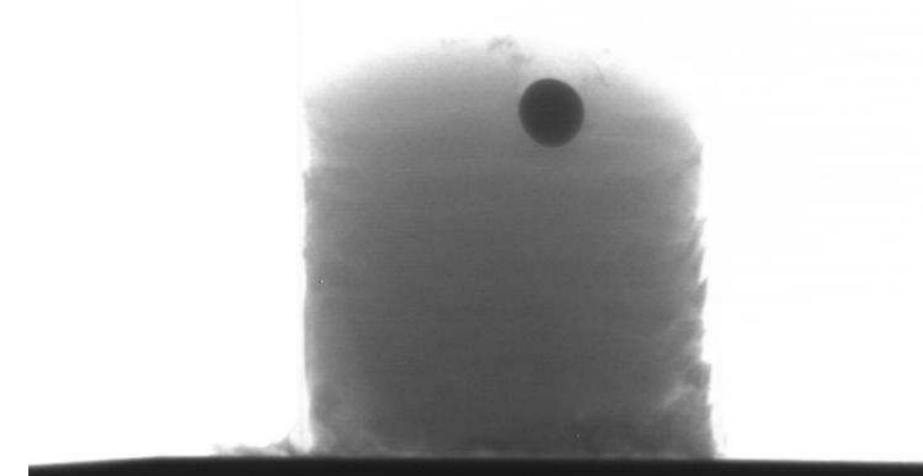
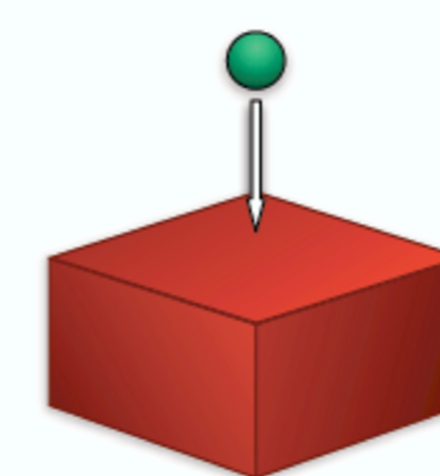


Das Material ähnelt interstellarem Staub: SiO_2 Monomere (d) bilden einen „Staubkuchen“ (a, b) durch zufällig-ballistische Ablagerung (c, Simulation).

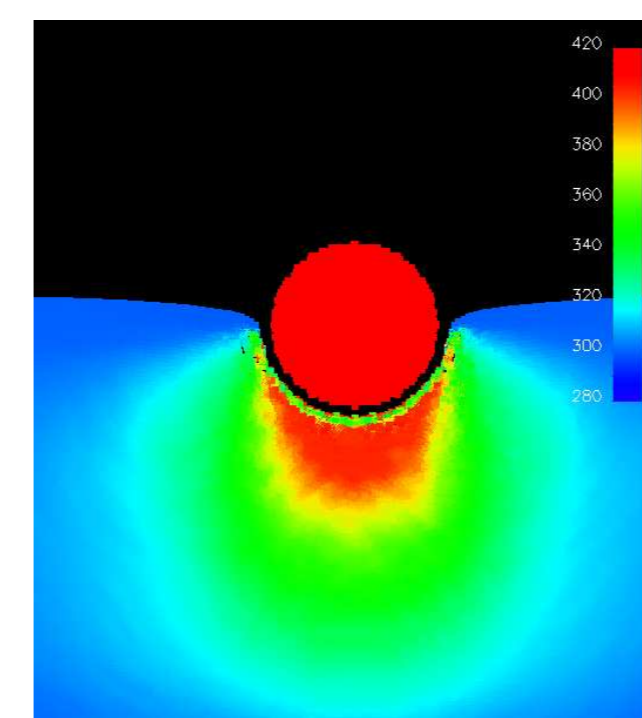
Vergleichsexperiment: Eine Glaskugel (Masse m) fällt mit Einschlaggeschwindigkeit v in einen Staubkuchen bestimmter Porosität.

Kalibrationsparameter:

- Abbremskurve
- Restitutionskoeffizient
- Eindringtiefe
- Menge des kompaktierten Materials
- Dichtestruktur



Röntgentomographische Aufnahme eines Staubkuchens nach dem Einschlag (Maya Krause, IGEP Braunschweig).



Simulation eines Einschlags mit $v = 1.23$ m/s, Kugeldurchmesser $d = 1.0$ mm, Masse $m = 2.1$ mg (Farbskala: Dichte)

Weiterführendes

Kooperation und Finanzierung innerhalb der **DFG Forschergruppe „Planet Formation“**

<http://www.tat.physik.uni-tuebingen.de/~fgp/>
Kooperierende Einrichtungen: Uni Tübingen, Uni Heidelberg, MPA Heidelberg, Uni Braunschweig, Uni Münster.
Sprecher: Wilhelm Kley

Literatur

W. Benz. Low Velocity Collisions and the Growth of Planetesimals. *Space Science Reviews*, 92:279–294, April 2000.

J. Blum and R. Schräpler. Structure and Mechanical Properties of High-Porosity Macroscopic Agglomerates Formed by Random Ballistic Deposition. *Physical Review Letters*, 93(11):115503, September 2004.

J. Blum and G. Wurm. Experiments on Sticking, Restructuring, and Fragmentation of Preplanetary Dust Aggregates. *Icarus*, 143:138, January 2000.

C. Dominik, J. Blum, J. N. Cuzzi, and G. Wurm. Growth of Dust as the Initial Step Toward Planet Formation. pages 783, 2007.

P. Goldreich, Y. Lithwick, and R. Sari. Final Stages of Planet Formation. *The Astrophysical Journal*, 614:497, October 2004.

C. Güttler, M. Krause, R. J. Geretshauer, R. Speith, and J. Blum. The Physics of Protoplanetary Dust Aggregates. IV. Towards a Dynamical Collision Model. *The Astrophysical Journal*, in press, 2009.

C. Schäfer, R. Speith, and W. Kley. Collisions between equal-sized ice grain agglomerates. *Astronomy and Astrophysics*, 470:733, August 2007.

S.-I. Sirono. Conditions for collisional growth of a grain aggregate. *Icarus*, 167: 431, February 2004.

S. J. Weidenschilling. Formation of Planetesimals and Accretion of the Terrestrial Planets. *Space Science Reviews*, 92:295, April 2000.

A. N. Youdin and F. H. Shu. Planetesimal Formation by Gravitational Instability. *The Astrophysical Journal*, 580:494, November 2002.