Computersimulationen und die simulierte Schnittstelle

Physikalische Systeme als Computer-Interfaces

Jochen Viehoff
Kunsthochschule für Medien Köln

1. Einleitung

Ohne Zweifel ist der Computer in den vergangenen Jahrzehnten zu einem der wichtigsten Werkzeuge nicht nur in der Physik, sondern auch in nahezu allen anderen Wissenschaftsfeldern avanciert. Computersimulationen komplexer Vorgänge in der Natur, die Visualisierung von Meßergebnissen und die Animation dynamischer Prozesse sind unverzichtbare Hilfsmittel geworden, durch die in vielen Wissensbereichen neue Einsichten und besseres Verständnis gewonnen werden konnte. Leistungsfähige Supercomputer sind heute die Herzstücke jeder Wettervorhersage, berechnen in aufwendigen Simulationen die Kräfte zwischen den Elementarteilchen oder sagen Strömungsverhalten und Turbulenzen an noch nicht gebauten Flugzeugen voraus [1]. Die Strategie der meisten Computersimulationen ist in der Regel gleich: die physikalischen Grundgleichungen werden näherungsweise mit numerischen Algorithmen für spezielle Rand- und Anfangsbedingungen gelöst, da zu den meisten realistischen Problemen keine exakte analytische Lösung verfügbar ist. Hierfür bedient sich der Wissenschaftler oder die Wissenschaftlerin aus einem Pool mehr oder weniger effizienter Algorithmen - zu den wichtigsten gehören beispielsweise die numerische Integration, Matrixinversionen oder stochastische Monte-Carlo Algorithmen [2].

Simulationen von physikalischen, biologischen oder chemischen Systemen sind ferner fester Bestandteil einer Computerkunst oder Kunst mit Maschinen. Genetische Algorithmen, in Anlehnung an die natürliche Evolutionstheorie und Genetik, neuronale Netzwerke, dynamische Systeme mit chaotischem oder selbstorganisierendem Verhalten oder Wachstumsstrategien lassen sich in Computersimulationen modellieren und auch in künstlerischem Kontext einsetzen. Außerdem ermöglichen numerische Algorithmen in Kombination mit physikalischen Gesetzmäßigkeiten schnelle 3D Animationen in Film und Fernsehen oder aufwendige Computerspiele, die in Echtzeit detailreiche realistische Räume aufbauen und modellieren - heute oftmals die rechenintensivsten Anwendungen eines PCs.

Allerdings ist die Bedeutung des Computers bei weitem nicht auf den Einsatz als Rechenwerkzeug in den Naturwissenschaften oder einer „künstlerischen“ Informatik beschränkt. Als die zentrale Maschine in einem multimedialen, global vernetzten Informationszeitalter steht insbesondere die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine (HCI, *human computing interaction*), kurz: das Interface, im Vordergrund bestehender und zukünftiger Anwendungen [3]. In diesem Zusammenhang möchte ich im vorliegenden Beitrag eine Zusammenführung der Simulation physikalischer Systeme einerseits und dem Design neuer Mensch-Maschine-Schnittstellen andererseits diskutieren: die simulierte Schnittstelle. Das Ziel der simulierten Schnittstelle ist ein komplexes, variables und erweiterbares Interaktionspotential zwischen Benutzer und einem Anwendungsprogramm, basierend auf den „klassischen“ Schnittstellen, etwa Maus, Tastatur, Mikrophon oder Videokamera. An einem konkreten Beispiel, der interaktiven Videoinstallation *TheLine*, die ich an der Kunsthochschule für Medien in Köln realisiert habe, wird das Prinzip einer simulierten Schnittstelle erläutert. Vorab sollen zwei Beispiele an die Welt der Computersimulationen heranführen.

2. Elementarteilchenphysik: Simulierte Quarks

Es gibt - grob gesprochen - zwei Kategorien für Computersimulationen: „harte“ und „weiche“ Probleme. Zuerst möchte ich ein Beispiel für wissenschaftliche Computersimulationen aus dem Bereich der Elementarteilchenphysik geben - ein sehr hartes Problem.

Sämtliche Materie dieser Welt ist aus Atomen zusammengesetzt, die im Kern aus Neutronen und Protonen bestehen und von Elektronen auf vorgegebenen Bahnen umkreist werden. So oder so ähnlich ist der Aufbau der Materie im Schulunterricht vermittelt worden. Indes sind weder Neutronen noch Protonen elementare Teilchen, sondern weisen ihrerseits eine Substruktur auf: Neutron und Proton bestehen aus jeweils drei elementaren Quarks und die wirkenden Kräfte zwischen den punktförmigen Quarks wird von der Quantenchromodynamik (QCD), einer Quantenfeldtheorie innerhalb des Standardmodells[1] , beschrieben [4,5].

Experimente im Bereich der Hochenergiephysik, in der mikroskopischen Welt, bei Abständen, die weit unterhalb eines Atomdurchmessers liegen[2], benötigen riesige Teilchenbeschleuniger, in denen z.B. Elektronen oder Protonen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden [6]. An nur wenigen Stellen weltweit stehen derartige Maschinen zur Verfügung. Durch kilometerlange Tunnel rasen die Partikel, um an vorbestimmten Stellen entweder auf ein festes Ziel zu treffen oder, um die Energie des Aufpralls zu verdoppeln, sie treffen auf Teilchen, die in dem Ring aufgrund ihrer entgegengesetzten Ladung genau andersherum beschleunigt werden. Aus den Trümmern der gewaltigen Kollisionen können die Wissenschaftler nach neuen Teilchen forschen oder die bekannten Theorien prüfen, gegebenenfalls erweitern oder verwerfen.

Alternativ und in Ergänzung zu Experimenten an Teilchenbeschleunigern haben Computersimulationen in der Elementarteilchenphysik einen hohen Stellenwert eingenommen [6]. Beispielsweise beobachtet man in keinem Experiment einzelne, isolierte Quarks - alle hadronischen Elementarteilchen sind aus zwei (Mesonen) oder drei Quarks (Barionen) aufgebaut, bilden gebundene Zustände innerhalb der starken Wechselwirkung, die von der Quantenchromodynamik, einer nicht-abelschen Eichtheorie, beschrieben wird [5]. Dieses Phänomen der stets gebundenen Quarks wird Eingeschlossenheit (Confinement) genannt. Allein Computersimulationen der QCD [7] geben eine Erklärung für die ständig eingeschlossenen Quarks: zwischen den getrennten Quarks bildet sich ein Flußschlauch aus (Abbildung 1), ähnlich einem Gummiband oder einer Feder. Daraus resultiert eine rückstellende, attraktive Kraft zwischen den Quarks [8]. Je größer der Abstand wird, desto dicker wird der Flußschlauch, umso stärker die rückstellende Kraft. In Computersimulationen wird dieser Mechanismus sichtbar - eine Erklärungsgrundlage für die experimentellen Beobachtungen in der Hochenergiephysik war gefunden.

Harte Probleme wie etwa realistische Computersimulationen in der Elementarteilchenphysik sind derzeit noch parallelen Supercomputern oder sogenannten PC Farms[3] vorbehalten. Ob-

---

[1] Zum Standardmodell der Elementarteilchenphysik gehören die Quantenfeldtheorien der elektro-schwachen und der starken Wechselwirkung. Mit Ausnahme der Gravitation umfaßt das Standardmodell alle elementaren Kräfte in der Natur.

[2] Der Atomdurchmesser (Bohr-Radius) liegt bei 10^{-10} m, Atomkerne haben einen Durchmesser von 10^{-14} bis 10^{-15} m.

[3] Unter einer PC Farm versteht man den Zusammenschluß vieler (z.B. 64, 128, 256...) handelsüblicher PCs mit einem schnellen lokalen Netzwerk zu einem leistungsfähigen, parallelen Supercomputer.

gleich in den Quantenfeldtheorien des Standardmodells sehr komplexe Interaktionsmöglichkeiten zwischen den einzelnen Konstituenten verborgen sind, eignen sie sich wegen des Recheinzeitaufwandes kaum als Grundlage für eine simulierte Schnittstelle, insbesondere dann nicht, wenn nur ein handelsüblicher PC zur Verfügung steht. Deshalb wird im folgenden Abschnitt ein einfacheres Modell aus der statistischen Physik vorgestellt - als Computersimulation ein weiches Problem.

3. Das Ising-Modell

Im zweiten Beispiel möchte ich kurz ein physikalisches System aus dem Bereich der statistischen Physik vorstellen, welches als Grundlage für eine simulierte Schnittstelle besser geeignet ist. Das Ising-Modell wurde ursprünglich von E. Ising zur Beschreibung der ferromagnetischen Eigenschaften von Metallen vorgeschlagen [9]. In seiner einfachsten Formulierung als Spin 1/2 Modell[4] in zwei Dimensionen kann das Ising-Modell bis ins Detail mit analytischen, mathematischen Methoden ausgewertet werden [10]. An diesen exakten Ergebnissen müssen sich approximative Computersimulationen des Modells messen.

Anschaulich kann das zweidimensionale Ising-Modell als ein Schachbrett interpretiert werden, wobei jedes Feld entweder schwarz oder weiß ist (Spin *up* oder *down*). Die Farbe eines jeden Feldes ist nicht konstant – im Gegensatz zu einem realen Schachbrett -, sondern kann von schwarz nach weiß und wieder zurück wechseln. Allein benachbarte Felder wissen etwas voneinander: die nächsten Nachbarn sind miteinander über eine Kopplungskraft verbunden. Sind alle vier nächsten Nachbarn beispielsweise weiß, ist die Wahrscheinlichkeit groß, daß auch das in der Mitte liegende Feld zur weißen Farbe wechselt. Sind zwei Nachbarn weiß und die restlichen zwei schwarz, hebt sich die summierte Kraft gegenseitig auf – das Feld bleibt wie es gerade ist. In der physikalischen Interpretation des Systems entsprechen die Felder den Spins der äußersten Elektronen eines Metallatoms. Ihre vollständige oder partielle Ausrichtung in eine Richtung ist die Ursache für ferromagnetische Eigenschaften von Metallen, z.B. Eisen.

Das Ising-Modell kann problemlos mit Monte-Carlo Algorithmen auf einem PC simuliert werden [11]. Dabei beobachtet man folgendes Verhalten in den Extremen: bei hohen Temperaturen überdeckt das thermische Rauschen in dem System die schwache Kopplung zwischen benachbarten Feldern. Die Magnetisierung des Metalls verschwindet. Bei sehr kleinen Temperaturen ist das System aufgrund der dann dominanten Kopplung zwischen den Feldern „eingefroren“. Entweder alle Felder sind schwarz oder alle Felder sind weiß. Ein Metall wäre dann maximal magnetisiert. Zwischen den Extremsituationen findet im Ising-Modell bei der kritischen Temperatur T_C ein sogenannter Phasenübergang statt. Oberhalb von T_C ist die Magnetisierung Null, unterhalb von T_C bilden sich bereits zusammenhängende Bereiche (Cluster) aus, die nur aus schwarzen oder weißen Feldern bestehen – das Metall ist teilweise magnetisiert und es können sich komplexe Strukturen ausbilden (Abbildung 3).

Mithilfe einer dynamischen Computersimulation des Ising-Modells kann der Benutzer nun am Rechner mit einem klassischen eindimensionalen Interface (z.B. unter Verwendung einer Richtungsdimension der Maus) über die Temperatur ein komplexes physikalisches System mit sehr vielen Freiheitsgraden und äußerst komplexen Verhalten steuern, und zwar in Echtzeit! (Probieren Sie unbedingt die in JAVA programmierte Simulation des Ising-Modells aus:

[4] Der Spin eines Teilchens charakterisiert einen zusätzlichen Freiheitsgrad, der in der klassischen Physik als Eigendrehung des Partikels eingeführt wird. In der Quantenphysik ist der Spin des Elektrons beispielsweise eine diskrete Größe: er kann nur in zwei entgegengesetzte Richtungen zeigen (+1/2 bzw. –1/2 oder up bzw. down).

http://bartok.ucsc.edu/peter/java/ising/keep/ising.html) Die einzelnen Felder (Spins) des Modells selbst stellen die Eingaben für ein nachgeschaltetes Programm dar, das im einfachsten Falle ein Grafikwerkzeug zur Visualisierung sein kann. Diese indirekte Interaktion zwischen einer konventionellen Schnittstelle und einem Anwendungsprogramm via Echtzeitsimulation eines physikalischen Systems ist ein Beispiel für eine simulierte Schnittstelle.

5. Eine simulierte Schnittstelle: *TheLine*

Für eine klassische Mensch-Maschine Schnittstelle werden Daten, gewonnen mit den unterschiedlichsten Techniken, an die entsprechende Computeranwendung – das Programm – übergeben oder empfangen. Grundsätzlich werden in vielen Schnittstellen ausschließlich Daten mit eindeutig definierter Richtung ausgetauscht, entsprechend einer Datenein- oder Datenausgabe. Neuere Schnittstellen erst ermöglichen die Ein- und Ausgabe mit einem Gerät, beispielsweise ein *touch screen* oder ein Steuerknüppel, auf dessen mechanische Komponenten sowohl der Benutzer als auch das Computerprogramm Kräfte ausüben kann (*sogenannte force back* Systeme). Wenn auch die meisten PCs heute immer noch mit einfachen Interfaces ausgerüstet werden – zum Lieferumfang gehören Tastatur, Maus, Bildschirm und optional Drukker bzw. Scanner – sind in den vergangenen Jahren neue, technisch versiertere Mensch-Maschine-Schnittstellen entwickelt worden. Dazu gehören die Körper-Sensoren aus dem Bereich der virtuellen Realität (VR), Cursor-Steuerung mit den Augen (*eye tracking*), rückgekoppelte Steuereinheiten, habtische Interfaces, um nur einige neue Techniken aufzuführen [10].

Die simulierte Schnittstelle dagegen greift auf konventionelle Interface-Techniken zurück. Der Unterschied besteht allerdings darin, daß ein Benutzer primär nicht mit dem Anwendungsprogramm in Interaktion steht, sondern stattdessen in die Simulation eines physikalischen Systems eingreift, das zwischen Interface und Anwendungsprogramm situiert ist. Die aktive Steuerung einer Computeranwendung weicht einer vermittelten Interaktion über die Freiheitsgrade eines physikalischen Systems. Ein Ziel der simulierten Schnittstelle ist also, mit einer konventionellen Schnittstelle zuerst ein System in Echtzeit zu steuern, welches unter Umständen viel mehr Freiheitsgrade besitzt als das Interface selbst, mit dem die physikalische Simulation gesteuert wird. Mit anderen Worten: die klassische Mensch-Maschine-Schnittstelle wird zusätzlich um das Interaktionspotential physikalischer Wechselwirkungen erweitert. Dazu können lokale Wechselwirkungen der klassischen Mechanik gehören, aber auch statistische oder quantisierte Interaktionen. Anhand eines Beispiels möchte ich eine simulierte Schnittstelle vorstellen.

TheLine ist eine von mir entwickelte interaktive Videoinstallation basierend auf den La Linea-Cartoons und Animationen von Oswaldo Cavandoli. Cavandoli zeichnet seine Cartoon-Figuren stets als eine durchgehende Linie (Abbildung 3). Ebenso werden Gegenstände in diese Linie integriert. Die Figuren von La Linea beziehen in vielen Animationen ihre formbestimmende Linie und deren materielle Beschaffenkeit mit in die Handlung ein: rütteln sie an dem Linienende, propagiert eine Welle durch ihren Körper und unterstreicht die physikalische Konsistenz der Linie.

TheLine nimmt die Zeichnung einer Figur mit einer Linie auf[5]. Es wird aber die Animation interaktiv von einem Beobachter generiert. Dazu wird mit einer Videokamera die Person auf-

[5] Die Idee für TheLine wurde gemeinsam mit Mone Kante entworfen, die z.Z. der Realisation von TheLine postgraduierte Studentin an der Kunsthochschule für Medien Köln war.

gezeichnet und in Echtzeit die Kontur – die Silhouette des Körpers vor der Projektionsfläche – abgeleitet. Als klassisches Video-Interface interpretiert könnten die errechneten Daten direkt an ein Visualisierungsprogramm weitergegeben werden. Die Linie wird kontinuierlich auf eine Leinwand projeziert, entsprechend dem jeweiligen Körperumriß. Im Gegensatz zu der simplen Nachzeichnung der Kontur besteht bei der hier diskutierten simulierten Schnittstelle die Linie aus 6000 bis 8000 einzelnen Kugeln, die wie auf einer Perlenschnur aufgezurrt sind und sich als physikalische Massen gemäß den Newton´schen Bewegungsgleichungen bewegen. Zwischen benachbarten Kugeln wirkt eine attraktive Federkraft. Der Körperumriß des Betrachters definiert in dem zweidimensionalen Bewegungsraum der Perlenkette ein Gravitationsfeld für die Massen. Die resultierenden Differentialgleichungen werden numerisch – ebenfalls in Echtzeit – integriert (symplektisch, 3. Ordnung) und die neuen Koordinaten der Kugeln visualisiert. Durch die Überlagerung der Kugelradien entsteht der Eindruck einer zusammenhängenden Linie. In dieser Umsetzung von La Linea geht der Betrachter in die Computersimulation des physikalischen Systems ein, indem er oder sie stets neu das die Dynamik bestimmende Gravitationsfeld einbringt. Abhängig von den gewählten Parametern der Simulation (Molekulardynamik [11]) konvergiert die Linie schnell oder langsam gegen die Kontur, klebt förmlich an dem Umriß oder schleicht träge den Bewegungen hinterher. Zuerst, bei Zuschalten der Gravitationskraft, erwächst die Silhouette aus der horizontalen Linie, bei Abschalten der Kraft zerfließt die Gestalt wieder (Abbildung 4). Ferner kann der Betrachter, nachgezeichnet aus der durchgehenden Linie, mit Schaltflächen in der Projektionsebene die Simulationsparameter selbst verändern, das Kraftfeld kurzzeitig ausschalten, oder sich bei kleinen Kopplungen von dem eigenen Schatten befreien. Bei Anwahl der kritischen Parameter, wenn also z.B. die Gesamtenergie bei der numerischen Integration nicht erhalten ist (zu großer Zeitschritt), zersprengt sich sie Perlenschnur und die einzelnen Kugeln, Bestandteile der Linie, fliegen in alle Richtungen davon.

Weil die Interaktion des Betrachters mit der Linie im simulierten Raum mittels physikalischer Kräfte stattfindet, verläuft die Steuerung der Linie in den unzähligen Freiheitsgraden, die eine in zwei Dimensionen schwingende, mit Federkräften intern gekoppelte Perlenkette hat, welche aus bis zu 10000 Massen besteht.

TheLine wurde präsentiert im Juli 2000 beim Tag der offenen Tür an der Kunsthochschule für Medien (Projektlabor der Kunst- und Medienwissenschaften). Auf einem Apple Macintosh G4 Rechner wurde die Bilderfassung und die vollständige Bildanalyse, ferner die Computersimulation einer physikalischen Perlenkette, wie auch die Visualisierung in Echtzeit als JAVA Programm (Applet) realisiert.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Numerische Algorithmen für die Lösung von physikalischen Grundgleichungen sind in vielen Computeranwendungen, verstärkt auch im künstlerischen Kontext, im Einsatz. Computersimulationen einfacher physikalischer Modelle nehmen dabei nur einen geringen Teil der Rechenleistung in Anspruch, die auf modernen Computern, beispielsweise einem PC oder einem Apple Macintosh G4, zur Verfügung stehen. Dadurch wird es möglich, zwischen die bestehenden Hardware-Schnittstellen des Computers und dem Anwendungsprogramm ein simuliertes physikalisches System zu positionieren: die simulierte Schnittstelle. Diese Systeme können beispielsweise der statistischen Physik entnommen werden (Ising-Modell) oder der klassischen Mechanik. Am Beispiel der interaktiven Videoinstallation *TheLine* diente die Simulation einer Perlenkette mit Techniken aus der Molekulardynamik als simulierte Schnittstelle zwischen einer Video-Kamera und einem Visualisierungsprogramm.

Die Mensch-Maschine-Interaktion findet innerhalb der dynamischen Simulation statt, indem ein zusätzliches Kraftfeld eingeschaltet wird und zusätzlich auf die Perlenkette einwirkt. Die Parameter des numerischen Algorithmus können über Schaltelemente in der Interaktion variiert werden. Die Ausgabe des simulierten Interfaces sind - in diesem Falle - die Koordinaten der einzelnen Kugeln und dienen als Eingabe für ein Grafikprogramm. Weitere Ausgabewerte, wie z.B. die Geschwindigkeiten der einzelnen Massenpunkte, wurden nicht verwertet.

Bei *TheLine* wird der Benutzer oder die Benutzerin selbst zum Bestandteil der dynamischen Simulation und kann direkt mit der Perlenschnur, bzw. ihrer Visualisierung in Wechselwirkung treten. Das resultierende Interaktionspotential ist um die Freiheitsgrade einer physikalischen Perlenkette erweitert, die sich gemäß den Newton‘schen Bewegungsgleichungen in einem äußeren Graviationsfeld bewegt.

Als Ausblick möchte ich eine weitere simulierte Schnittstelle kurz vorstellen, die derzeit an der Kunsthochschule für Medien entwickelt wird. In der Computersimulation wird eine Gitarrensaite und eine darunter liegende Tonabnehmerspule simuliert. Durch die Schwingung der Saite wird ein Induktionsstrom in der Spule generiert, der in überlagerte Töne umgerechnet wird. Für die Interaktion mit dem System werden alle Handbewegungen vor der projezierten Gitarrensaite mit einer Videokamera aufgenommen und in Echtzeit analysiert. In die Simulation der Gitarrensaite werden diese Daten als realistische, physikalische Kräfte auf das schwingende Objekt interpretiert. Somit findet die Interaktion mit der virtuellen Saite auf Ebene der physikalischen Tonerzeugung statt, die Klänge entstehen dynamisch während der Interaktion, gemäß den mechanischen bzw. elektromagnetischen Grundgleichungen. Im Prinzip ist das resultierende Interaktionspotential zwischen Hand und schwingender Saite beliebig groß.

In Zukunft könnten simulierte Schnittstellen das Spektrum bestehender Interface-Techniken wesentlich erweitern. Komplexes Interaktionsverhalten wird auch ohne technisch aufwendige Apparate möglich, indem die Vielfalt an natürlichen Wechselwirkungen in untergeordnet ablaufenden Computersimulationen zugänglich gemacht wird. Insbesondere in Anbetracht der Tatsache, daß die Rechenleistung moderner Computer in den letzten Jahren enorm angewachsen ist, erscheinen in Echtzeit simulierte physikalische Systeme als interessante Alternative zu einem aufwendigen und kostspieligen hoch technologisierten Interface-Design.

Referenzen

[1] W.J. Kaufmann, L.L. Smarr: „Simulierte Welten“ (Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1994)
[2] W.H. Pree, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery: „Numeric Recipes in C“ (Cambridge University Press, Cambridge 1992)
[3] B.A. Myers: "A Brief History of Human Computer Interaction Technology." (ACM interactions, Vol. 5, no. 2, pp. 44-54, 1994)
[4] J.D. Bjorken, S.D. Drell: „Relativistische Quantenmechanik“ (BI Wissenschaftsverlag, Mannheim 1966). C. Itzykson, J.B. Zuber: „Quantum Field Theory“ (McGraw Hill Inc., Singapore, 1980)
[5] Otto Nachtmann: „Particle Physics. Concepts and Phenomena“ (Springer Verlag, Berlin 1998)
[6] Bryant, Philip J. and Johnsen, Kjell: „The Principles of Circular Accelerators and Storage Rings“ (Cambridge University Press, Cambridge, 1993)

[7] M. Creutz: „Quarks, Gluons and Lattices“ (Cambridge University Press, Cambridge, 1983). H.J. Rothe: „Lattice Gauge Theory – An Introduction“ (World Scientific Publishing, Singapore, 1992)
[8] G.S. Bali, K. Schilling, C. Schlichter: „Observing long color flux tubes in SU(2) lattice gauge theory.“ (PhysRev..D51, 1995, pp. 5165-5198; e-Print Archive: hep-lat/9409005)
[9] E. Ising: „Beitrag zur Theorie des Ferromagnetismus“ (Zeitschrift für Physik 31, pp. 253-258, 1925)
[10] L. Onsager: „Crystal Statistics. I. A Two-Dimensional Model with a Order-Disorder Transition“ (PhysRev 65, pp. 117-149, 1944)
[11] K. Binder, D.W. Heermann: „Monte Carlo Simulation in Statistical Physics. An Introduction.“ (Springer Verlag, Berlin, 1997)

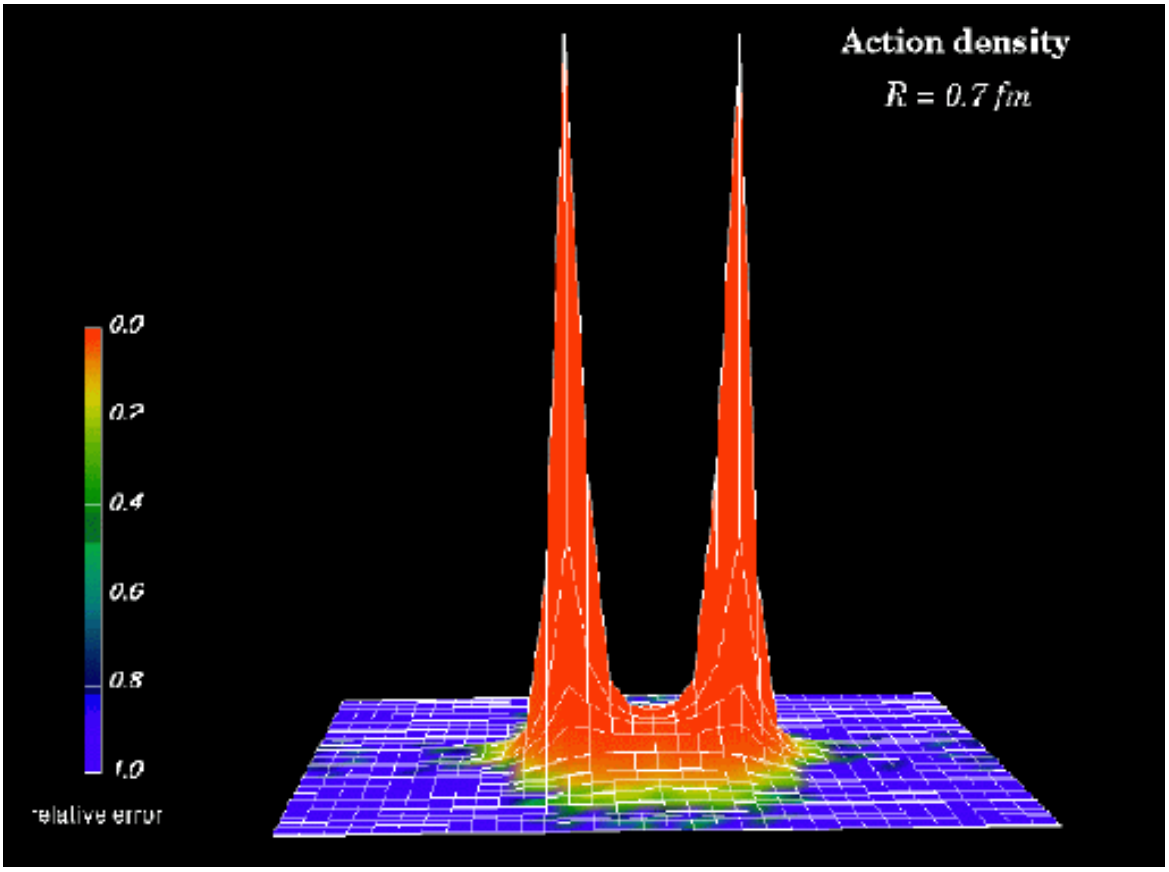
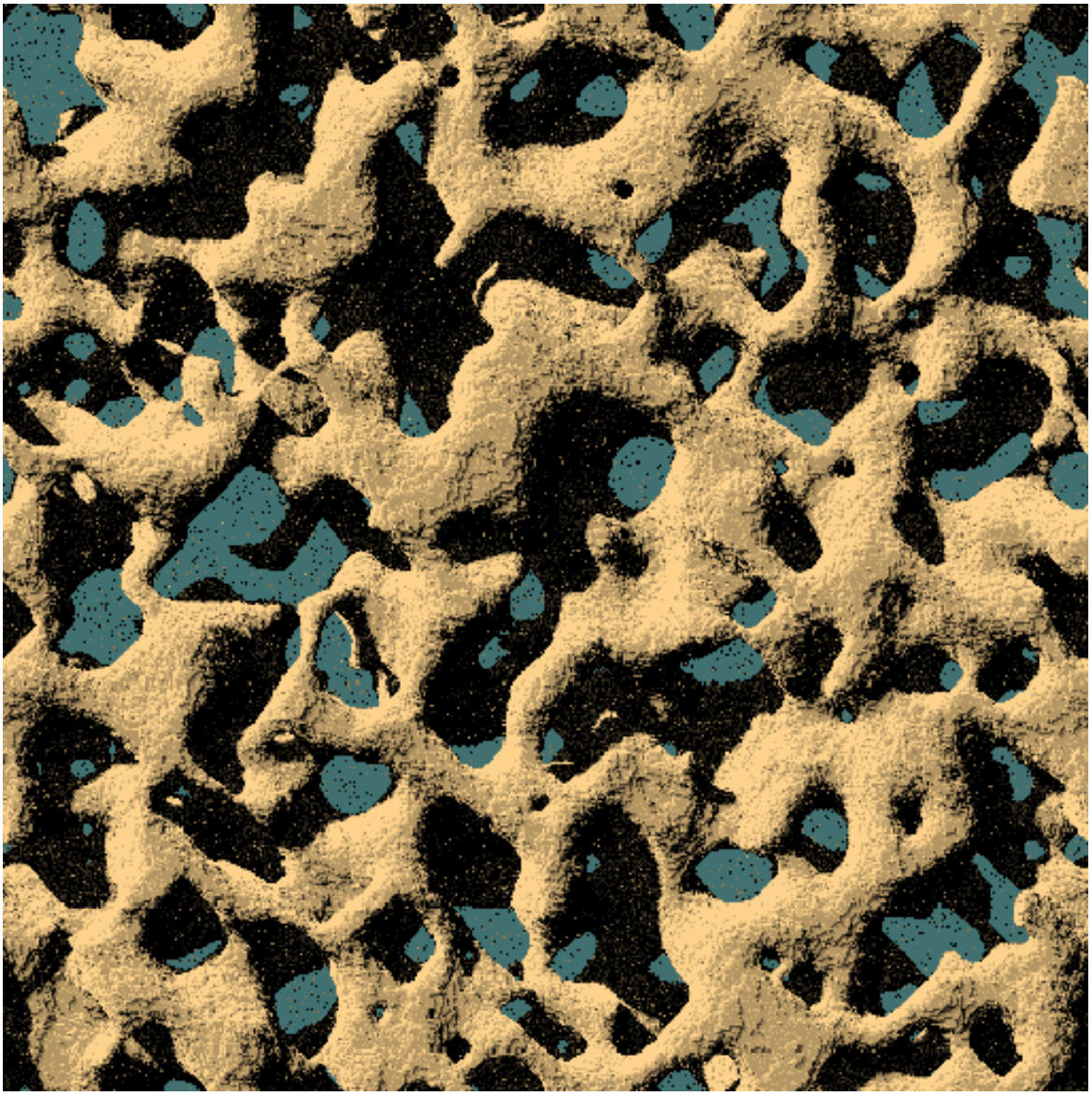
Abbildungen

Fig. 1: Die Energiedichte in der Umgebung eines Quark-Antiquark Paares im Computerexperiment (Gitter-Simulation): die Spitzen in der Energieverteilung entsprechen den Positionen der Quarks. Zwischen den Partikeln bildet sich ein Flußschlauch (String) aus, der bei großen Abständen eine lineare Rückstellkraft zwischen den Partikeln impliziert. Je weiter die Quarks auseinander gezogen werden, desto dicker wird der Flußschauch. Dieses Phänomen wird als Eingeschlossenheit (Confinement) der Quarks bezeichnet und erklärt, warum im Experiment keine einzelnen Quarks beobachtet werden. Die Farben der Abbildung kennzeichnen den relativen Fehler der Meßgröße. Computersimulationen der starken Wechselwirkung sind extrem rechenzeitaufwendig und erfordern nach wie vor leistungsfähige Supercomputer [8].

Fig. 2: Computersimulationen in der statistischen Physik: bereits das einfache Ising-Modell generiert komplexe Strukturen in der Nähe des Phasenübergangs bei T_C. Das Spin-Modell beschreibt ferromagnetische Metalle bei unterschiedlichen Temperaturen. Die Simulationen sind leicht zu programmieren und benötigen für kleinere Systeme nur einen geringen Teil der Rechenleistung eines modernen PCs.

Fig. 3: La Linia: Cartoon von Oswaldo Cavandoli. Die Zeichnungen und Animationen bestehen aus einer stets durchgehenden Linie und dienen als grundlegende Idee für die interaktive Videoinstallation *TheLine*.

Fig.4: TheLine: interaktive Videoinstallation. Die Linie besteht aus 6000-8000 einzelner Kugeln. Für die Echtzeitanimation werden die physikalischen Bewegungsgleichungen numerisch in einer Computersimulation gelöst. Benachbarte Kugeln sind über eine Federkraft miteinander verbunden. Aus einem Videobild wird die Kontur einer oder mehrerer Personen abgeleitet und als Gravitationskraft in die Simulation eingefügt. Die entstehende Dynamik in der Animation der Kette wird über physikalische Parameter gesteuert (Zeitschritt der Molekulardynamik, Masse der Kugeln, Kopplungskonstanten): die Linie kann hartnäckig an den Konturen „kleben“ oder gemächlich auf die Silhouetten der Körper zusteuern.


Action density
R = 0.7 fm
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
relative error