

sonar

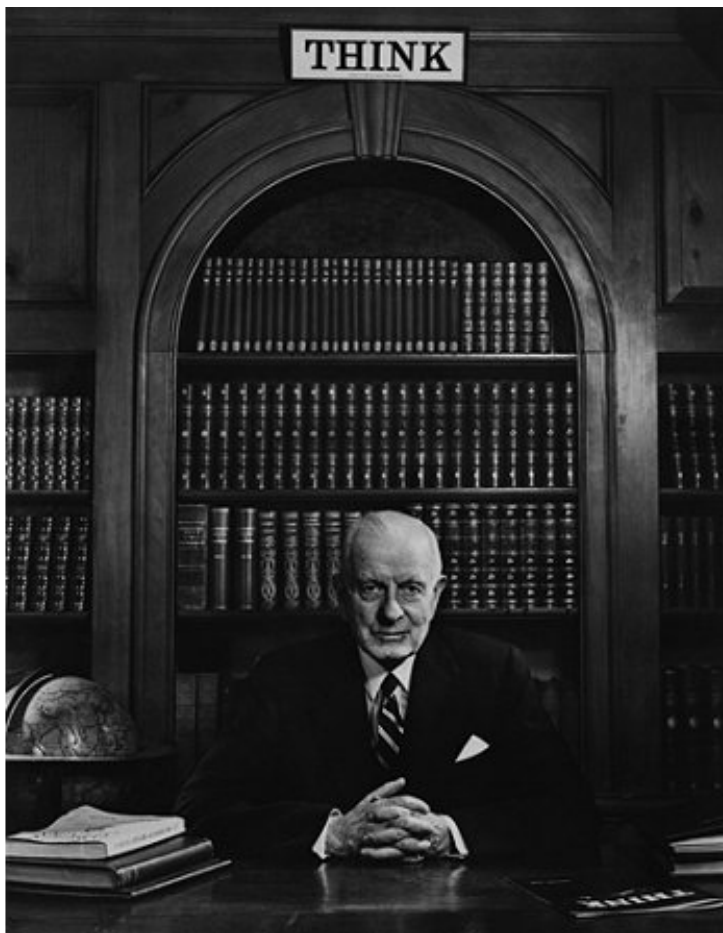
Simulation Stories

Version 3.0

Status : for general use

Author : Fritz Leibundgut, L&G Software

© L&G Software 2018



Thomas J. Watson, IBM

Es gab einmal eine Zeit da war die Bezeichnung 'Computer' in der Begriffswelt der Menschen gleichbedeutend mit 'IBM' und umgekehrt. Man sprach von sog. Elektronengehirnen, also Apparaten, von denen niemand so richtig verstand wie sie funktionierten.

Inhalt

Frühe Versuche mit Simulationen	1
SIN code	2
Der Schmetterlingseffekt	3
Die Saturn Raketen der NASA	5
Die Türme von Hanoi.....	6
Der erste 'Bug'	7
Schnellere Segler.....	8
Simulierte Menschen, Androiden	9
Simulatoren in der Chirurgie	10
Stealth Fighter	11
Nuklearwaffen Entwicklung/Instandhaltung	12
Space Shuttle Software	13
Space Shuttle Columbia Unfall	14
Simulationen knackten den Code	15
Simulationen mit zellulären Automaten	16
Simulation --> dunkle Materie	17
Simulation = 3. Säule der Wissenschaft	18
Die Entstehung des Mondes	19
Der 9. Planet.....	20
Die Zukunft der virtuellen Realität	21
Autonomes Fahren simulieren	22
Das Wetter und das Klima simulieren	23
Tornados simulieren.....	24
Der Flugsimulator	25
Der simulierte Windkanal	26
Bruchbelastung simulieren	27
Gesichter erkennen	28
Blue Brain Project.....	30
Erdbeben simulieren	31
Die Entwicklung der Rechengeschwindigkeit	32
Bionisch simulieren	33
Wolkenkratzer simulieren	34
Der getürkte Simulator.....	35
Mondflug Simulatoren	36
Schwerelosigkeit simulieren.....	37
Den freien Fall simulieren	38
Crash Test Dummies	39
Simulierter 'Car Crash'	40
Simulations-Spiele.....	41
Kinematik als Kunst simulieren	42
Der simulierte Golfball	43
Mechanische Analogcomputer	44
MH370 - das verschollene Flugzeug.....	45
Ist das ganze Universum 'nur' eine Simulation?	46

Frühe Versuche mit Simulationen

Bereits in den 20-er Jahren des letzten Jahrhunderts beschrieb ein gewisser Lewis Fry Richardson in seinem Buch *Weather Predictions by Numerical Processes* eine Anordnung, um mit finiten Differenzen Methoden die Wettervorhersage zu berechnen. Er stellte sich einen kugelförmigen hohlen Raum vor, welcher in ein Netzgitter zerlegt war. Der Raum war ein Abbild der Erdoberfläche. In jeder Gitterzelle sass ein menschlicher „Rechner“, welcher ein Gebiet der Erdoberfläche abdeckte. Jeder Rechner berechnete auf Grund verschiedener physikalischer Grössen wie Druck und Temperatur in der Umgebung seiner nächsten Nachbarn die physikalischen Werte für den nächsten Zeitpunkt in seiner Zelle. Im Zentrum der Kugel stand ein Dirigent, welcher für die Synchronisation der Rechner sorgte. Moderne Computerprogramme für die Wettervorhersage und für Klimaberechnungen funktionieren im Prinzip (rein rechnerisch) genauso. Man weiss aber heute, dass die einzelnen menschlichen Rechner des Mr. Richardson, auch wenn Sie rund um die Uhr gerechnet hätten, um mehrere Grössenordnungen zu langsam gewesen wären, um in angemessener Zeit ein brauchbares Ergebnis zu liefern.

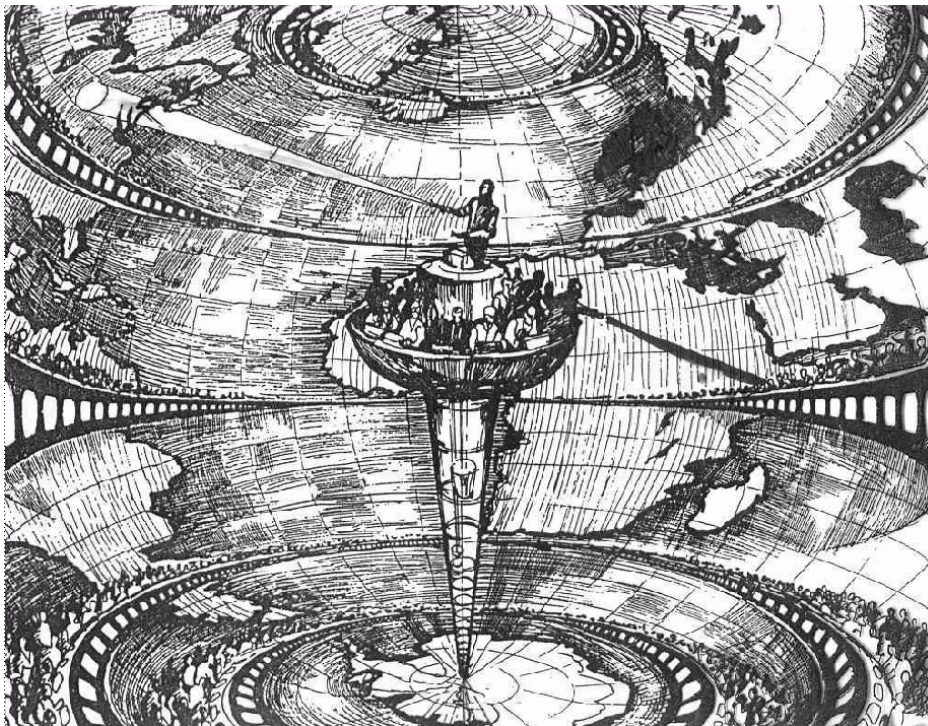


Abb. 1: Wettervorhersage nach Lewis Fry Richardson

SIN code

Der sog. SIN-code ist eines der ältesten Computerprogramme welches für die Simulation von Schockwellen in Zusammenhang mit Metallen und Explosivstoffen geschrieben wurde. Wie so viele Computerprogramme dieser Art entstand es in einem militär-wissenschaftlichen Forschungsinstitut in den USA. Noch in den 50-er Jahren des vorangehenden Jahrhunderts entwickelt, steht es seit ca. 1960 bis heute im Einsatz. Der SIN-code ist räumlich ein 1-dimensionales Programm und kann folglich nur für rein planare und kugelsymmetrische Problemstellungen eingesetzt werden.

Der Name 'SIN' = 'Sünde' wurde dem Programm von den ersten Anwendern gegeben, weil die Berechnungen auf den damaligen Computern Tage oder Wochen dauerten. Man erachtete es als eine Verletzung göttlicher Gesetze solchermassen komplexe und zeitraubende Berechnungen durchzuführen um damit letztlich die göttliche Schöpfung von physikalischen Vorgängen zu hinterfragen. Man konnte sich damals noch nicht vorstellen, dass die Rechenzeit der damaligen Simulationen durch die Fortschritte in der Computer-Hardware bereits in den 70er Jahren auf Minuten schrumpften und heute auf einem modernen Personal Computer vielleicht noch ein paar Sekunden oder weniger in Anspruch nehmen.



FIGURE 1. IBM 7090 am Ames Research Center der NASA 1961

Die ersten Versionen dieses Codes wurden noch in reiner Maschinensprache geschrieben und auf Computern des Typs IBM-7090 und 7030 eingesetzt. Später im Laufe der 60-er Jahre wurde das Programm auf die erste wissenschaftliche Computersprache FORTRAN umgeschrieben. L&G Software implementierte den SIN-code während des Anbruchs des Personal Computer Zeitalters in den frühen 80-er Jahren mit der Programmiersprache 'Pascal' auf einem Apple-2 Computer und führte damit die ersten wissenschaftlichen Finite-Differenzen Berechnungen von Problemstellungen aus dem Bereich der Detonik auf PC's durch.

Der Schmetterlingseffekt

Als die Wissenschaftler lernten mit Simulationsprogrammen umzugehen, da wurde offensichtlich, dass die Anfangsbedingungen einer Simulation bezüglich der Genauigkeit der Resultate eine wichtige Rolle spielen. Mit den Anfangsbedingungen sind die genauen physikalischen Werte vor dem Simulationsstart gemeint. Dazu gehören unter vielen anderen die Masse, der Schwerpunkt, die Geometrie, die Geschwindigkeit usw. eines jeden einzelnen Teils, das an der Simulation teilnimmt. Die aufgezählten Grössen sind diesbezüglich noch nicht sehr problematisch. Schwieriger wird es, wenn physikalische Randerscheinungen wie Reibung oder Dämpfungseffekte bei Stössen ins Spiel kommen, Effekte also, die in der Technik seit je her schwierig abzuschätzen sind.

Eine besonders grosse, um nicht zu sagen zentrale Rolle, spielen die Anfangsbedingungen bei chaotischen Phänomenen. Wir kommen nochmals auf die Wettervorhersage zurück. Wie bereits erwähnt, kann, oder besser gesagt wird, eine sehr kleine Änderung an den Anfangsbedingungen dafür sorgen, dass das Wetter nach einiger Zeit zuerst lokal und später global in eine völlig andere Richtung umschlägt. Dass dies passiert, ist nicht von der absoluten Grösse dieser Änderung abhängig. Wenn die Änderung kleiner gemacht wird, dann verzögert sich der Wetterumschlag einfach, aber er kommt.

Wird nun, um ein Beispiel anzuführen, eine Wettervorhersage auf dem Rechner mit gegebenen Anfangsbedingungen durchgeführt, dann wird man z.B. feststellen, dass die Vorhersage ca. drei Tage recht genau mit der Wirklichkeit übereinstimmt, zwei weitere Tage tendenziell richtig bleibt und dann in eine andere Richtung umschlägt. Im Nachhinein kann man nun genauer untersuchen, wo die Ursachen für diese Fehler liegen. Man kann an den Anfangsbedingungen herummanipulieren, bis man schliesslich erreicht, dass das Wetter mit geringfügig anderen Anfangsbedingungen bis zu sieben oder acht Tagen mit der Wirklichkeit übereingestimmt hätte. Eine kleine Änderung führt also nach wenigen Tagen zu einem anderen Wetter.

Wir wollen das Gesagte nun mit folgendem Gedanken-Experiment verfeinern. Betrachten wir nun einmal nur das Simulationsprogramm für die Wettervorhersage allein, losgekoppelt vom wirklichen Wetter. Mit gegebenen Anfangsbedingungen lassen wir das Programm eine hypothetische Vorhersage für die nächsten 180 Tage vornehmen.

Nun kommen wir zum Punkt und machen Folgendes. Wir ändern die Anfangsgeschwindigkeit des Windes lokal, an einem einzigen Ort um einen unendlich kleinen Wert, bzw. um den kleinst-möglichen Wert, den der Computer gerade noch verarbeiten kann. Es handelt sich um einen Luftstoss, den ein Schmetterling mit einem Flügelschlag erzeugt. Der gesamte Rest der Anfangsbedingungen wird identisch übernommen. Starten wir nun die Simulation erneut, dann werden wir beobachten, dass sich z.B. vier oder fünf Monate später irgendwo plötzlich sichtbare Abweichungen aufbauen die dazu führen, dass sich nach sechs Monaten das Wetter grossräumig anders entwickelt und über dem Atlantik ein Hurrikan gebildet wird der bei der ersten Simulation nicht entstand.

Nachprüfen bzw. in der Wirklichkeit nachvollziehen kann man diesen Schmetterlingseffekt natürlich nicht. Auf dem Computer jedoch kann man ihn sehen. Dieser Effekt hat nichts mit den verwendeten Gleichungen bzw. mit dem mathematischen Modell der Wetter-Physik zu tun. Er hat auch nichts mit einem Problem zu tun, der nur auf dem Computer existiert. Er hat vielmehr etwas mit dem

Verhalten und dem Funktionieren der Natur an sich zu tun. Ein Schmetterling beeinflusst das Wetter...

Ist das nun die Wirklichkeit oder eher ein philosophisches Problem?

Die Chaos-Theoretiker sagen uns, dass das so ist. Jedes Lebewesen, das sich auf dieser Welt irgendwo regt oder bewegt trägt so seinen eigenen Teil bei zur Wetterentwicklung. Nicht Petrus macht das Wetter - Jeder und Jedes macht es.



Die Saturn Raketen der NASA

Die Saturn-V Rakete welche die amerikanischen Astronauten zum Mond brachte, war das erste Grossprojekt, welches mit der sog. Finite-Elemente Methode berechnet wurde. Die ersten Ideen zur Entwicklung einer FE-Software kamen um 1960 auf. Im Laufe der ersten Hälfte der 60-er Jahre wurde ein Konsortium zur Entwicklung einer Software mit dem Namen NASTRAN gegründet (NAsa STRuctural ANalysis). Die Entwickler der Saturn Rakete waren sich bewusst, dass die Schwingungs- und Vibrationsprobleme mit grösser werdenden Ausdehnungen der Raketenstruktur immer gefährlicher werden und zunehmend schwieriger zu beherrschen sind. Ein visionärer Wissenschaftler (Tom Butler) am Goddard Space Center hatte die Idee diese Schwingungstests auf dem Computer durchzuführen statt ein riesiges Schwingungstestsystem zu bauen welches die gesamte reale Rakete in Schwingungen versetzen müsste. Damit war die NASTRAN Software und ein neuer Weg Ingenieur-Probleme zu lösen geboren.

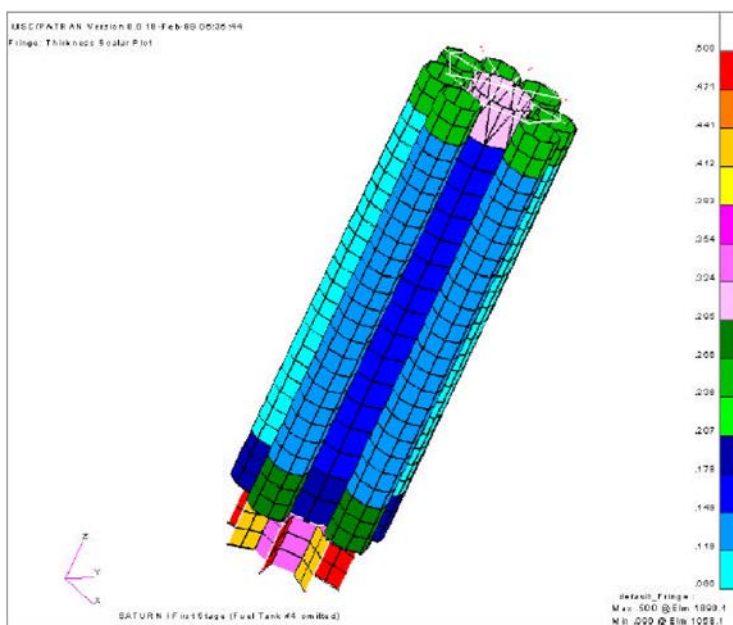
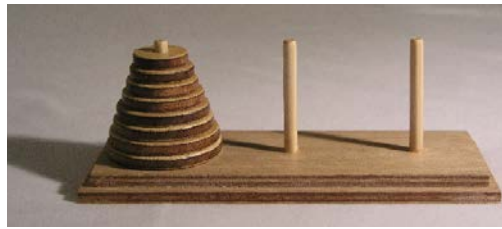


FIGURE 2. Abbildung aus: SPACECRAFT STRUCTURAL ANALYSIS TODAY AND YESTERDAY by Charles R. Gamblin, P. E. Senior Lead Engineer – Structures Group, Teledyne Brown Engineering, Huntsville, Alabama. NASTRAN is a registered trademark of NASA. MSC/NASTRAN is an enhanced, proprietary version developed and maintained by MacNeal-Schwendler Corporation.

Die Auflösung der Raketenstruktur in Elemente ist für heutige Verhältnisse fast schon zum Schmunzeln. Man muss sich aber die Grenzen und die Leistungsfähigkeit der damaligen Computer vor Augen halten, die bei diesen Problemstellungen bereits an ihre Grenzen stiessen. Die Abbildung zeigt eine Berechnung an der ersten Stufe der Rakete Saturn-1B aus dem Jahr 1962, einer Vorgängerversion der nachfolgenden eigentlichen Mondrakete Saturn-V. Die Berechnungen der Belastung der Struktur müssen für viele Zustände der Rakete wiederholt werden, denn die Masse des Treibstoffes nimmt während des Fluges kontinuierlich ab.

Der Name 'NASTRAN' dürfte auch heute noch jedem Ingenieur der sich mit der Finite-Elemente-Methode beschäftigt ein Begriff sein.

Die Türme von Hanoi



Es handelt sich um ein Spiel mit der Regel einen Turm vom Stapel links auf den Stab rechts zu verschieben mit der Einschränkung, dass immer nur eine Scheibe bewegt wird und nie eine grössere Scheibe auf eine kleinere zu liegen kommen darf. Woher das Spiel kommt lässt sich nicht mehr eindeutig klären. Wenn man der Geschichte glauben will hat es der französische Mathematiker Édouard Lucas im Jahre 1883 erfunden und auch gleich eine spannende Geschichte dazu angeboten:

Indische Mönche im Tempel zu Benares hatten, wahrscheinlich durch eine göttliche Eingebung, die Aufgabe erhalten, das Problem für 64 Scheiben zu lösen. Wenn sie mit der Lösung des Problems am Ende seien, dann werde gleichsam das Ende der Welt gekommen sein.

Vor längerer Zeit ist mir noch eine weiter ausgeschmückte Geschichte zu dieser Problemstellung begegnet. Diese erzählte, dass die Mönche, nachdem sie sich schon längere Zeit mit der Verschiebung beschäftigten, erkannten, dass sie mit der Lösung nicht wirklich vorankamen. Tatsächlich lässt sich berechnen, dass die Lösung mit 64 Scheiben bei einer Geschwindigkeit von einem Zug pro Sekunde ca. 500 Milliarden Jahre dauert. So gesehen ist die Behauptung, das Ende der Welt sei bei einer Lösung des Problems zu erwarten, nicht so abwegig, denn das Universum hat im Moment ein Alter von ca. 14 Milliarden Jahren. Um die Sache zu beschleunigen wandten sich die Mönche in den 60-er Jahren des vorangehenden Jahrhunderts an IBM. Diese versprachen Ihnen, die Sache beim Kauf eines Computers der neusten Generation rein rechnerisch beschleunigen zu können. So geschah es, dass die Mönche sich nach der Installation des Computers in ihrem Tempel an die simulierte Lösung des Problems machten, während die IBM-Techniker wahrscheinlich darauf drängten die Heimreise anzutreten, um die 'Enttäuschung' des alsbald nicht eintretenden Weltuntergangs nicht vor Ort miterleben zu müssen.

se non è vero, è ben trovato

(auch wenn sie nicht wahr ist, so ist es doch eine nette Geschichte)

Der erste 'Bug'



FIGURE 3. Harvard Mark I Computer (Foto: IBM Archives)

Im Jahr 1943 realisierte Howard H. Aiken zusammen mit IBM den Harvard Mark-1 Computer. Als Schaltelemente dienten 'Relais' mit denen der Computer drei Operationen pro Sekunde schaffte. 1945 fand die Bedienerin der Harvard Mark-2 Anlage auf der Suche nach einer Fehlfunktion zwischen den Blattfedern eines Relais eine Motte. Diesen 'Bug' klebte sie neben die Erklärungen in das Logbuch des Computers. Fortan hießen Computer- und Softwarefehler bis zum heutigen Tag 'Bug'.

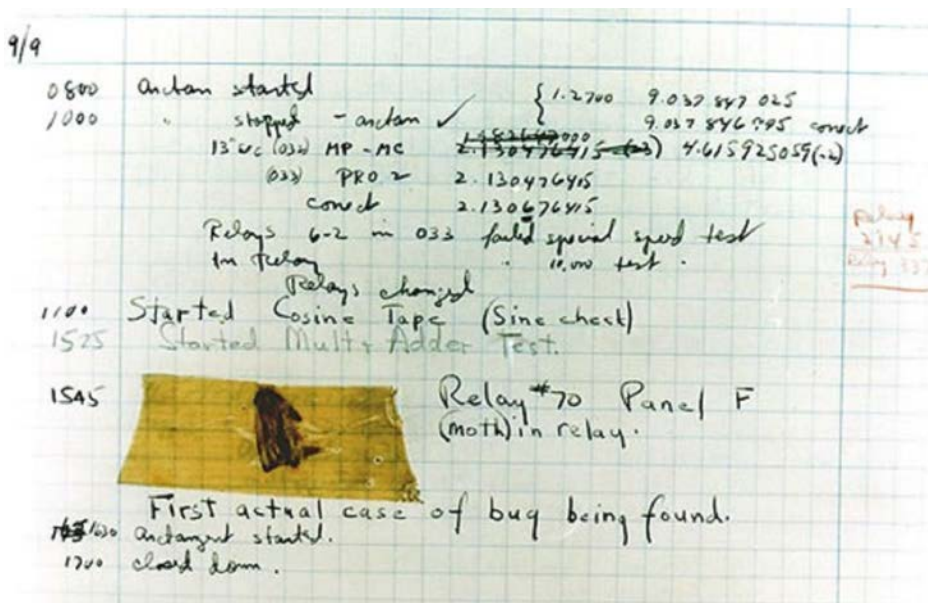
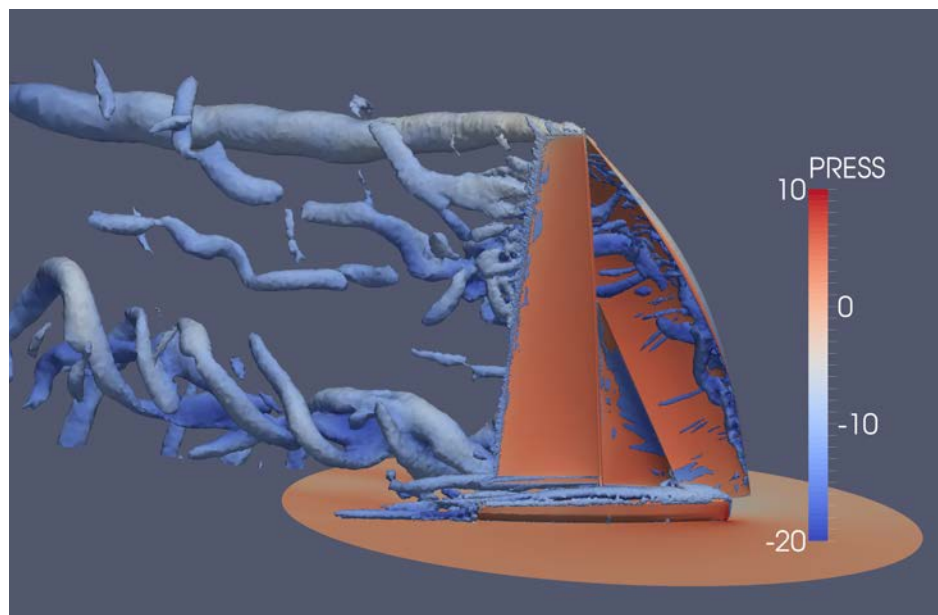


FIGURE 4. Der Eintrag im Logbuch mit eingeklebter Motte und der Erklärung: Erster gefundener Fall eines Insekts in einem Relais.

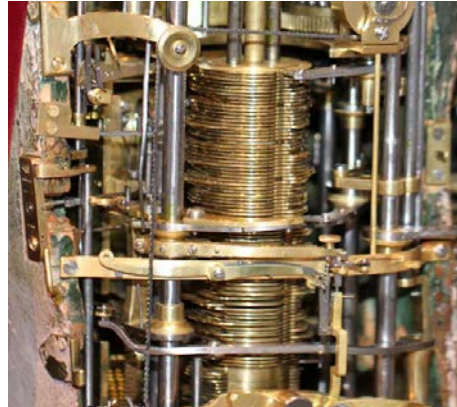
Schnellere Segler

Die Teilnehmer am America's Cup, dem Segelwettbewerb mit grossen Segelschiffen über grosse Distanzen scheuten keine Kosten um das Letzte aus ihren Schiffen herauszuholen. Mit relativ aufwendigen hydro- und aerodynamischen Simulationen wurde der Bootskörper und das Segel optimiert und mittels Finite-Elemente Programmen das Gewicht minimiert. Die Gewichtsreduktion wurde insbesondere auch auf die Segelstoffe ausgedehnt. Diese sind übrigens 3-dimensionale Flächen welche mit Simulationen Form-optimiert wurden. Bereits eine Verbesserung von lediglich einem Prozent ergibt auf einen Kilometer Distanz einen Vorsprung von zehn Metern. Das mag wenig erscheinen, aber auf tausend Kilometer Rennstrecke macht das bereits zehn Kilometer Vorsprung. Legendär sind die Rennen zusammen mit der 'Alinghi', einem Schweizer Boot welches als erstes europäisches Schiff den America's Cup für sich entscheiden konnte.



Die Simulation und Optimierung von Bootskörper und Segel ist im Übrigen ein Musterbeispiel dafür, wie wichtig in einem solchen Wissensgebiet die Simulationstechnologie ist. Es ist schlichtweg nicht bezahlbar und zeitlich unmöglich hundert Varianten von Verbesserungen zu bauen und zu testen. Selbst wenn man solche Varianten bauen würde, dann ist es fast unmöglich diese Effekte isoliert zu messen und den Vorteil in eine Zahl zu fassen, allein weil die Umweltbedingungen nie konstant sind. Ganz anders in einer Simulation. Diese hat den grossen Vorteil, dass man kleinste Änderungen irgendwelcher Art absolut gezielt unter sonst gleichen Bedingungen simulieren, messen und optimieren kann. Dies ist eine starke Seite der Simulationstechnik. Das gleiche gilt z.B. auch in der Ärodynamik bei der Optimierung von Flügeln von Passagierflugzeugen.

Simulierte Menschen, Androiden



Die Idee künstliche Menschen zu erschaffen ist nicht neu. Nebst den vielen Autoren welche sich diesem Stoff literarisch annahmen gab es bereits früh Ingenieure welche mechanische Menschen schufen. Der Schweizer Uhrmacher Jacques Droz (1721-1790) schuf im 18-ten Jahrhundert eine ganze Reihe von genialen Apparaten, welche nicht nur seine Zeitgenossen sondern auch uns heute noch in Erstaunen versetzen. So gibt es, um nur ein Beispiel zu nennen, den abgebildeten Androiden, welcher in seinem Körper eine programmierbare mechanische Einheit enthält, welche ihm erlaubt, selbständig einen beliebigen, ihm vorgegebenen Text auf ein Stück Papier zu schreiben. Die Mechanik ist so aufgebaut, dass für jeden Buchstaben des Alphabets Kurvenscheiben abgefahren werden, welche sämtliche Bewegungen des Körpers, des Arms und der Hand über '-zig' Hebel und Achsen automatisch so steuern, dass eine natürliche Gesamtbewegung des künstlichen Menschen entsteht. Der Automat ist in der Lage alle vorgegebenen bzw. vorprogrammierten Buchstaben in einen kontinuierlichen Text mit automatischer Zeilenschaltung auf ein Stück Papier niederzuschreiben. Er vollbringt das mit einem richtigen Federhalter und mit richtiger Tinte, die er übrigens auch noch regelmässig selbst aus einem Tintenfasschen holt. Eine Auswahl von J. Droz' Androiden gibt es im 'Musée d'art et d'histoire' in Neuchâtel, Schweiz zu sehen.





FIGURE 5. Geburtshilfe Simulator von Säcken, Frankreich aus dem Jahr 1758.

Wie die erste Abbildung zeigt, sind medizinische Simulatoren keine Neuigkeit aus dem Computerzeitalter. Heutzutage gibt es allerdings praktisch für jeden chirurgischen Eingriff sowohl Hardware- als auch Software-mässige Simulatoren, welche dem angehenden Arzt oder Chirurgen als Uebungsobjekte zur Verfügung stehen.

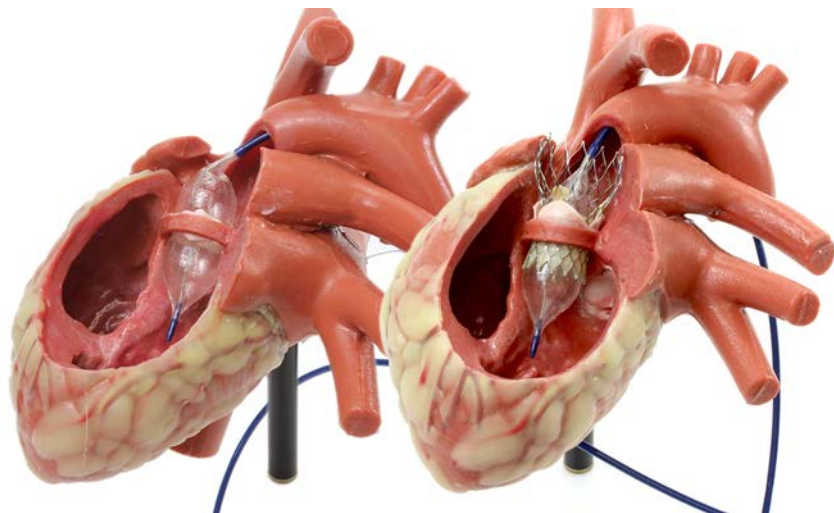


FIGURE 6. Herz Bypass Simulation. Bild ReHaGe International

Stealth Fighter



Der amerikanische Jäger und Bomber F-117 Nighthawk wurde in den 70-er Jahren des letzten Jahrhunderts als erstes Flugzeug gezielt als für Radar unsichtbares Flugobjekt entwickelt. Ein Flugzeug welches diese Fähigkeiten besitzen soll, muss in erster Linie bestimmte Formen der Oberfläche haben. Hinzu kommen weitere Massnahmen, wie spezielle mikrowellenabsorbierende Materialien, Beschichtungen, Bemalungen, usw. Diese Verfeinerungen tragen allerdings nur dann einen Nutzen, wenn sie auf der Basis einer speziellen Oberflächenform angebracht werden.

Die Form des Jägers lässt erahnen, um welche Eigenschaften der Formgebung es geht. Der abgebildete Jäger zeichnet sich dadurch aus, dass er aus wenigen gleich geneigten Flächen besteht, welche zudem möglichst parallel verlaufen. Diese Flächen sind alle so angeordnet, dass die Radarstrahlen auch bei Mehrfachreflektionen an der Oberfläche nie an den Ursprungsort bzw. in die Ursprungsrichtung zurückkehren, und zwar unabhängig davon aus welcher Richtung sie kommen und wo auch immer sie auf der Oberfläche auftreffen. Um diese relativ komplexe Fragestellung zu beantworten und die Form des Flugzeuges dahingehend zu optimieren, muss eine gegebene Oberfläche ähnlich einem 'Ray Tracing' Bildbearbeitungsverfahren für jeden Fleck der Oberfläche und für jeden Einfallswinkel auf diesen Fleck den Strahlengang der Mikrowellen berechnen. In den 70-er Jahren war diese Gesamtsimulation mit den verfügbaren Supercomputern der damaligen Zeit (Cray-1) nur für ganz einfache rudimentäre Formen möglich. Das Ergebnis dieser Bemühungen war ein ungewöhnlich hässliches Flugzeug, welches trotz vieler aerodynamischer Konzessionen die Anforderungen erfüllte und auch noch flugfähig war.

Spätere Generationen von Flugzeugen mit Stealth-Eigenschaften hatten aerodynamisch bereits schönere Formen. Offenbar gelang es, auch gerundete Oberflächenteile anzubringen, welche trotzdem die ursprünglichen Anforderungen des Reflektion-Verhaltens erfüllen konnten.

Nuklearwaffen Entwicklung/Instandhaltung

Die Entwicklungsgeschichte der Supercomputer ist eng verknüpft mit der numerischen Simulation von Nuklearwaffen. Bereits der erste Supercomputer vom Typ Cray-1 wurde 1976 vom Los Alamos National Laboratory in Betrieb genommen und in der Simulation von Komponenten von Atomwaffen eingesetzt. Mit zunehmender Rechenleistung gewann der Computer in diesem Entwicklungsbereich generell immer mehr an Bedeutung. Damit einher ging die Entwicklung von Simulationsprogrammen um die entsprechenden Berechnungen durchzuführen. Heute existiert für jeden Teilbereich der Nuklearwaffenentwicklung ein sog. Schlüsselprogramm, welches wie ein Mosaikstein einen bestimmten Bereich der Entwicklung abdeckt. Ein solches zentrales Programm ist z.B. eine Variante des DYNA2D- und seines Nachfolgers, des DYNA3D-Codes. Von einigen dieser Programme entstanden mit der Zeit auch kommerzielle Abkömmlinge welche schwerpunktmässig in eine andere Richtung weiterentwickelt wurden und die Funktionen zur Simulation von Sprengstoffen, Neutronen, usw. nicht mehr enthalten. Ein solcher Abkömmling ist der sog. LS-DYNA-code. Die eigentliche DYNA-3D Software wurde von den Lawrence Livermore Laboratories zum PARADYN-Code weiterentwickelt, welcher auf massiv parallelen Supercomputern der neusten Generation läuft.



Nach dem Kernwaffen-Teststopp und den entsprechenden Verträgen zwischen den Supermächten welche alle Kernwaffenversuche verbieten, ist die numerische Simulation eine Basistechnologie zur Entwicklung dieser Waffen geworden. Aus diesem Grund wurde dieser Vertrag auch erst dann umgesetzt, als sichergestellt war, dass alle Kernkompetenzen in der Nukleartechnologie auf dem Computer wirklichkeitsnah simuliert werden können. Die Supercomputer Entwicklung in den USA ist seither eng verbunden mit den nationalen Forschungslabors Los Alamos, Lawrence Livermore und Sandia Laboratories. Es sind die Orte welche immer die Top_500-Liste der schnellsten Computer der Welt anführen. Diese Forschungslabors sind nicht nur die Technologieträger der Kernwaffenentwicklung, sondern müssen heutzutage auch sicherstellen, dass das bestehende Atomwaffenarsenal funktionsfähig bleibt. Auch auf dem Gebiet des Unterhalts und insbesondere der Alterung einzelner Komponenten der Kernwaffen spielt die Simulation heute eine entscheidende Rolle. In Frankreich hat bezüglich Kernwaffensimulation mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung und auf einem niedrigeren Niveau, was den Aufwand anbetrifft, eine völlig analoge Entwicklung wie in den USA stattgefunden.

Space Shuttle Software

Als der Space Shuttle von der Startrampe abhob, hatten jeweils vier identische Computer an Bord des Raumschiffs das Kommando übernommen. Sie waren es, die entschieden ob die Feststoff-Booster gezündet werden oder nicht. Tausende von Sensoren lieferten in jedem Moment einen Zustand des Systems und die vier Computer glichen sich ständig gegenseitig ab, ob sie der gleichen Meinung waren was in jedem Moment zu tun sei. Auf die Software musste man sich verlassen können und zwar zu 100.0 %. Fehler waren keine Option. Es durfte nichts passieren an das man vorher nicht gedacht hatte und im Programm-Code durfte in keinem Moment eine Situation eintreten, an die man nicht bereits zum Voraus eine klar ausprogrammierte Lösung vorbereitet hatte. In keinem Augenblick durfte in irgendeiner Programmzeile ein Variablenwert einfließen, der in der Berechnung der betreffenden Formel zu einem Problem führen könnte.

Wie schreibt man eine umfangreiche Software fehlerfrei? Jeder professionelle Softwareentwickler weiss, dass es ab einer gewissen Grösse und Komplexität einer Software nicht mehr möglich ist, mit den normalen Entwicklungswerkzeugen ein Computerprogramm ohne Bugs zu schreiben. Microsoft wurden von Beta-Testern nach der Freigabe der ersten Windows-7 Systemsoftware aus der ganzen Welt ca. 2000 verschiedene Fehler gemeldet. Wie viele über die Jahre unentdeckt bleiben oder aus anderen Gründen nie gemeldet werden ist nicht bekannt.

Um die enorm hohen Anforderungen an die Space Shuttle Software zu erfüllen, mussten nicht nur äusserst umfangreiche und detaillierte Tests vorgesehen, sondern vor allem neue Wege beschritten werden, wie die Software grundsätzlich geschrieben werden muss. Es war das Gegenteil der freien, chaotischen code-Erzeugung, wie sie alle Programmierer so lieben. Es war eine fast unendlich detaillierte Planung die bis hinunter zu jeder Programmzeile vorschrieb, was diese zu tun habe und welche Anforderungen jede Variable in der betreffenden Linie erfüllen müsse und im Hinblick auf welche Möglichkeiten diese Linie Code zu überprüfen und zu testen sei, usw.

Am Ende waren es auch neue Test-Software-Entwicklungen, welche die gesamte Shuttle-Software in Milliarden von Testläufen und unter Variation und Permutation aller möglichen Input-Daten, unter die Lupe nahmen. Vollständige systematische und eine grosse Anzahl von zufälligen Variationen der einströmenden Sensordaten durften nie zu einem Fehler führen. Es war die umfassendste Software-Simulation die bis zu diesem Zeitpunkt auf der Welt durchgeführt wurde. Wie wir heute wissen, hat die Software bis an das Ende der Shuttle Ära sehr zuverlässig funktioniert. Es waren am Ende andere Fehler, die zu den Space-Shuttle Katastrophen führten.



Space Shuttle Columbia Unfall

Die Ursache für den Absturz des Space Shuttle Columbia während dem Wiedereintritt in die Erdatmosphäre war eine defekte Flügelvorderkante, hervorgerufen durch den Aufprall eines abgelösten Isolierschaumteils eine Woche zuvor während dem Aufstieg in den Weltraum. Ereignisse der Art, dass sich Schaumstoffteile beim Start vom Tank des Shuttles lösen konnten, waren schon länger bekannt. Man hielt es aber nicht für möglich, dass leichte Bruchstücke aus Polyurethanschaum der mit Kohlefasern verstärkten Strukturen der Flügelvorderkante jemals gefährlich werden könnten.

Als man nach dem Unfall sowohl experimentelle Tests als auch numerische Simulationen dieser Vorgänge durchführte, war man sehr erstaunt, welche Wirkung diese leichten Teile bei hohen Geschwindigkeiten anrichten konnten. Als man zur Kenntnis nahm, wie diese Teile in den Simulationen die Vorderkante des Shuttles sprichwörtlich zertrümmerten, war jedermann mit technischem Gespür klar, was sich damals am Himmel über Texas abgespielt haben muss.

Die folgende Abbildung zeigt eine experimentelle Simulation des Aufpralls eines Schaumstoffteils auf die Vorderkante des Flügels:



FIGURE 7. from: A Summary of the Space Shuttle Columbia Tragedy and the Use of LS Dyna in the Accident Investigation and Return to Flight Efforts by Matthew Melis and Kelly Carney NASA Glenn Research Center Cleveland, OH, Jonathan Gabrys Boeing Philadelphia, PA Edwin L. Fasanella US Army Research Laboratory/VTD Karen H. Lyle NASA Langley Research Center Hampton, VA

Simulationen knackten den Code

Die ENIGMA war die Standard Chiffriermaschine der Deutschen Wehrmacht und Marine während des zweiten Weltkriegs. Sie galt für die Deutschen als absolut sicher und nicht zu knacken. Der Durchbruch zur Entschlüsselung gelang den Engländern in Bletchley Park in der Nähe von London mit Hilfe der sog. 'Bombe'. Es handelt sich letztlich um eine technische Simulation der realen Chiffriermaschine. Der innere Mechanismus der Originalmaschine wurde in eine elektromechanisch arbeitende Apparatur übertragen, welche 'de facto' das gleiche leistete wie die Original Enigma, einfach viel schneller.

Die Chiffrierung in der Originalmaschine geschah in den sog. Trommeln, von denen es in der Abbildung rechts vier gibt. In jeder Trommel wird ein Buchstabe durch entsprechende innere elektrische Verdrahtungen in einen anderen Buchstaben umgewandelt. Das elektrische Signal durchläuft, ausgehend von der Tastatur, alle Trommeln hin und wieder zurück und bringt am Ende eine Buchstaben-Lampe zum Leuchten. Nach jedem Tastendruck werden die Trommeln um eine Stellung weitergedreht wie der Kilometerzähler in alten Autos. Folglich wird die Enigma nach jedem Tastendruck neu verdrahtet. Erschwert wurde das ganze durch zusätzliche Massnahmen wie ein Steckbrett mit manueller Vertauschung von Buchstaben und einem geheimen Code-Buch mit Tageseinstellungen der Startposition der Trommeln. Schliesslich wurde vor jeder Datenübermittlung noch ein 'zufälliger' Code per Enigma übermittelt, welcher eine weitere Verschiebung der Einstellungen der eigentlichen Nachricht zur Folge hatte.

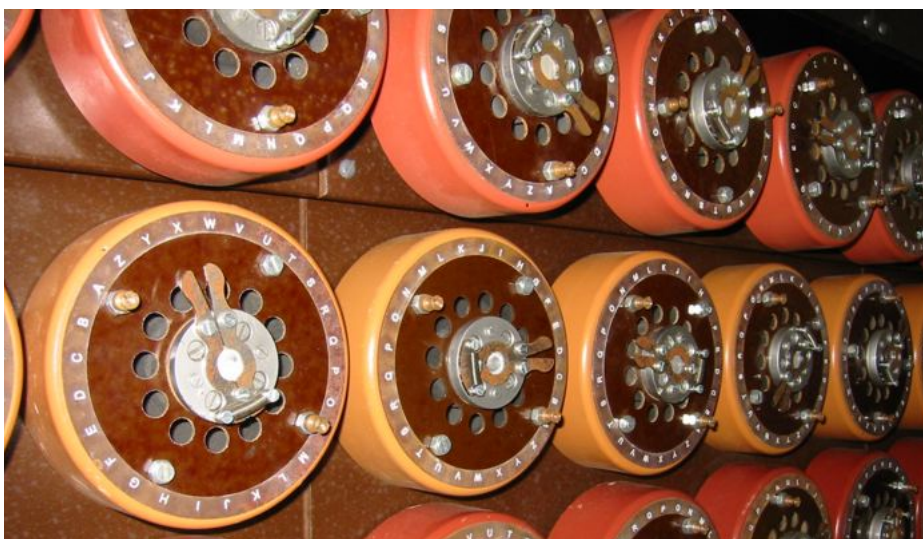


FIGURE 8. Enigma Bombe

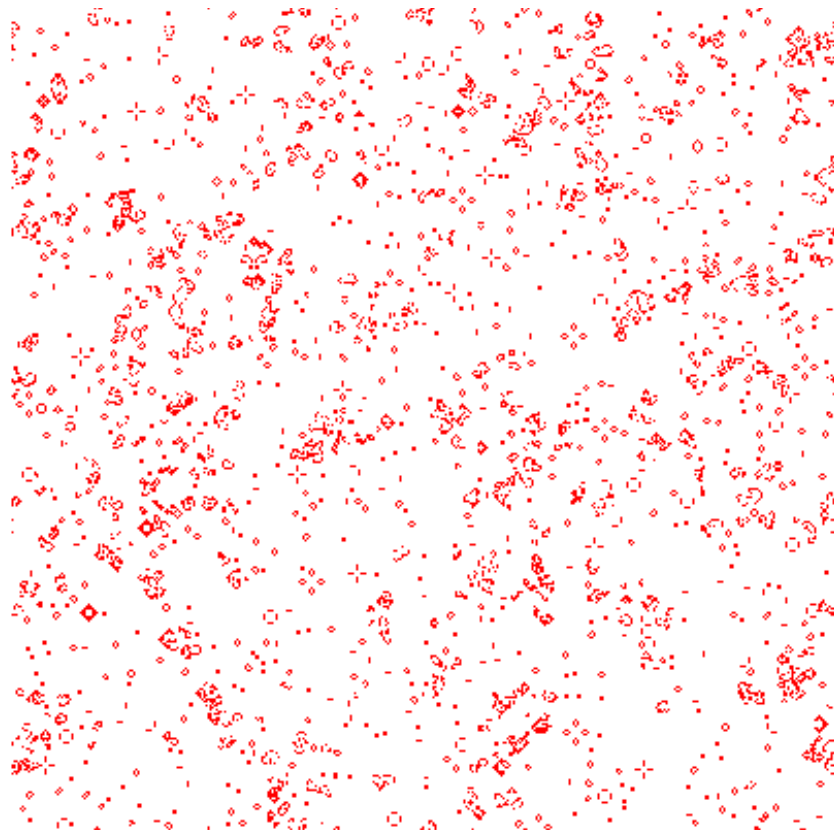
Die Tageseinstellungen waren durch gekaperte Code-Bücher bekannt. Eine grosse Anzahl von sog. 'Bomben' suchten im abgehörten Funkspruch durch systematisches Probieren aller Trommelstellungen nach einem lesbaren Text. Gesucht wurde nach sog. 'cribs', d.h. vermuteten Wörtern oder Wortkombinationen wie 'Heil Hitler' oder 'Stab General Jodl' usw. Diese cribs konnten dem jeweiligen Absender mit der Zeit relativ sicher zugeordnet werden.

Simulationen mit zellulären Automaten

Der Mathematiker John Horton Conway entwickelte 1970 das Spiel des Lebens (The Game of Life). Es handelt sich, mit der modernen Terminologie umschrieben, um eine EXCEL-Tabelle welche mit zufällig verteilten virtuellen Lebewesen bevölkert wird. In jedem Schritt des Spiels, welches auf dem Computer übrigens von selbst läuft, kann das Lebewesen in einer EXCEL-Zelle entweder sterben, weiterleben oder sich vermehren, je nachdem wie viele Lebewesen in seinen Nachbarzellen im Moment vorhanden sind und in welchem Zustand sich diese befinden. Die Regeln können natürlich beliebig verändert werden und führen zu verschiedenen Spielverläufen. Mit den Standardspielregeln, wie von Conway vorgeschlagen, ergeben sich mehrere stabile Zellgruppen (Mehrzeller) welche dynamisch durch die Matrix wandern, andere Lebewesen, vielleicht mit anderen Regeln, auffressen, an Überbevölkerung sterben, usw.



Alle Aspekte eines evolutionären 'Lebens' ergeben sich auf wundersame Weise wie von selbst vor dem Auge des Betrachters. Es entsteht ein ständiges Auf und Ab von Entwicklungen welche, wie im richtigen Leben, Abweichungen vom Gleichgewicht bestrafen und die Überbevölkerung fördert wo keine Gegner Einhalt gebieten.



<http://www.zahl-art.de/game-of-life/>
http://www.galaxygoo.org/blogs/2006/07/conways_game_of_life.htm

Simulation --> dunkle Materie



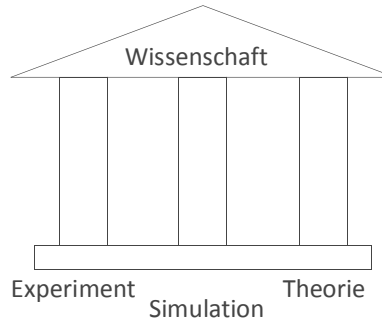
Mit Simulationsprogrammen wie sonar ist man in der Lage die Bewegung einer ganzen Galaxis aus einer grossen Anzahl von Massepunkten dynamisch zu simulieren und zu beobachten, wie sich die Spiralarme um das gemeinsame Zentrum drehen. Die Drehung einer realen Galaxis zu beobachten ist aus rein zeitlichen Gründen nicht möglich. Eine Umdrehung dauert im Durchschnitt mehrere hundert Millionen Jahre.

Führen wir die Bewegung einer Galaxis aber simulationstechnisch durch, kommen wir zu einem erstaunlichen Ergebnis. Eigentlich dürften die Galaxien gar nicht so aussehen wie sie aussehen. Weil die Wirkung der Gravitationskraft nach dem $1/r^2$ -Gesetz in Richtung der äusseren Arme stark abnimmt, müssten sich diese im Randbereich entsprechend langsam bewegen, andernfalls fliegt die Galaxis radial auseinander. Umgekehrt würden die Galaxis-Arme mit der Zeit unendlich gedehnt, wenn sich die Umlaufgeschwindigkeit radial wie erwartet nach Newton berechnet. Die Galaxis-Arme 'verschmieren' so gesehen mit der Zeit zu einer homogen verteilten Massescheibe, ähnlich dem Saturnring, wie wir ihn von der Erde aus beobachten.

Die Beobachtung widerlegt die gängige Newton'sche Physik, und zwar unabhängig davon wie gross die Masse im Zentrum der Galaxis angenommen wird. Erst wenn man die gesamte Galaxis-Scheibe mit einer hypothetischen, gleichverteilten aber stationären Masse ergänzt, also einer Masse die statisch auf die sichtbare Masse wirkt, sich aber dynamisch nicht bewegt, erst dann ergeben sich in den Computersimulationen die gleichen Bilder wie wir sie beobachten. Daraus schliessen die Astrophysiker, dass es eine 'dunkle' Materie geben muss. Das wesentliche an diesem Sachverhalt ist aber, dass es sich dabei nicht um eine 'Masse' handelt die wir einfach noch nicht gesehen haben. Diese dunkle Materie funktioniert offenbar nicht nach den Newton'schen Gesetzen. Das ist das wesentliche. Es ist etwas Neues.

Simulation = 3. Säule der Wissenschaft

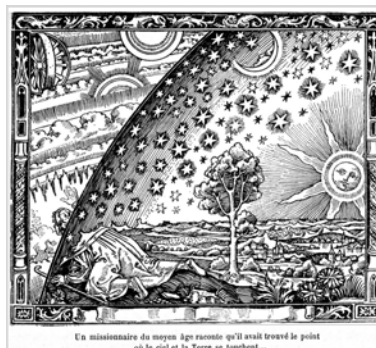
Lange Zeit bestand die Wissenschaft aus dem direkten Zusammenspiel zwischen Experiment und Theorie. Seit dem Aufkommen der Computer kommt zu diesen beiden Säulen der Wissenschaft eine dritte hinzu. Die Simulation stellt sich als Vermittler zwischen diesen beiden Standbeinen.



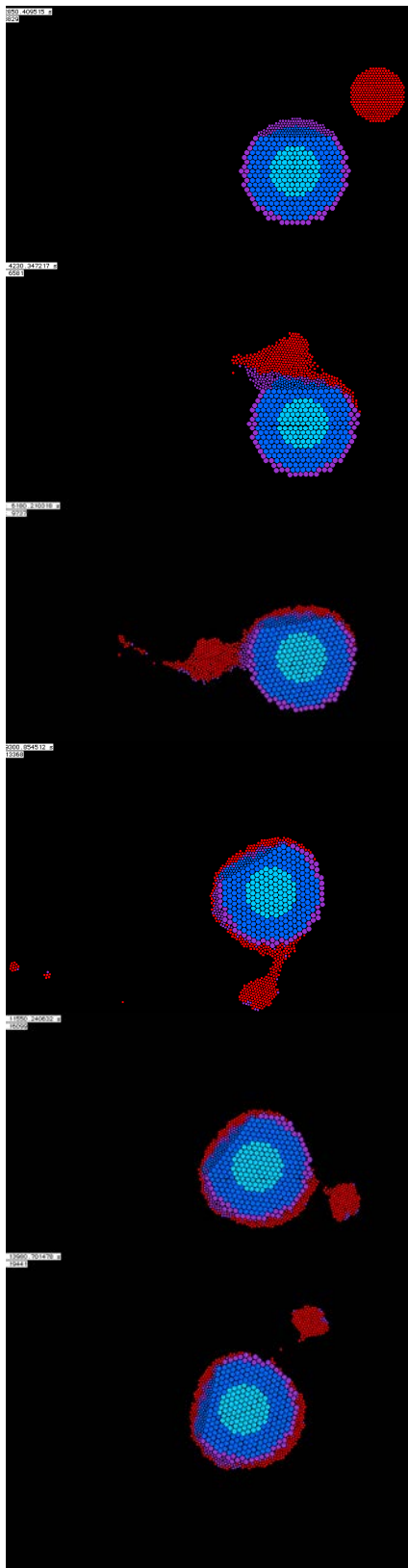
Die numerische Simulation erweitert die theoretischen Berechnungsmöglichkeiten des Ingenieurs und Wissenschaftlers in einer Weise wie sie mit analytischen Berechnungsmethoden nie möglich wäre. Umgekehrt sind heute mit Simulationen virtuelle Experimente möglich, die in dieser Variationsbreite und -tiefe mit rein experimentellen Methoden nicht zu bezahlen wären. Mit Simulationen kann auch das Unmögliche, das experimentell Undurchführbare, das Gefährliche, das Verbotene oder das noch nie Stattgefundene ausprobiert werden. Die Simulation ist eine Erweiterung des Gehirns. All das, was wir uns bislang nur denken oder vorstellen konnten, können wir jetzt virtuell durchführen. Und zwar nicht nur mit der Kraft unserer Phantasie im Kopf, sondern quasi real.

Wir befinden uns heute erst am unmittelbaren Anfang dieser Entwicklung. Es ist schlichtweg nicht vorstellbar, welche Möglichkeiten uns in Zukunft noch eröffnet werden. Sicher ist, dass die Simulation sich unter anderem in folgende Richtungen entwickeln wird:

- immer leistungsfähigere, komplexere Simulationen mit zunehmend höherer Auflösung und höherem Detaillierungsgrad.
- die Software wird immer einfacher zu bedienen
- virtuell immer näher an der Realität
- dreidimensional holografisch begehbare Simulationen (3D-Brille)
- der Mensch wird in die Simulation eintauchen können, am Ende soweit, dass er die virtuelle Welt nicht mehr von der Realität unterscheiden kann.
- es werden dabei alle Sinne angesprochen



Die Entstehung des Mondes



Unser Mond entstand, so die wissenschaftliche Vermutung, in der Frühzeit des Sonnensystems durch die Kollision eines Planeten der Grösse des Mars mit der Erde. Der Kollisionspartner wurde bei diesem Vorgang völlig zerstört und produzierte aus den Trümmern unseren Mond. Bereits mit der älteren Simulations-Software SILUX, die der Autor der sonar-Software in den 90-er Jahren schrieb, konnte mit Hilfe einer 2.5-dimensionalen Simulation der eigentliche Kollisionsvorgang und die Bildung des Mondkerns im Laufe der ersten Erdumrundung simuliert werden. Simulationen dieser Art zeigen eindrücklich, wie mit Simulationen Vorgänge nachgestellt werden können, die analytisch unmöglich zu berechnen wären.

Interessant an dieser Bildfolge aus einem Simulationsfilm ist die himmelsmechanische Bildung eines Kerns, der nach Vollendung der ersten Erdumrundung auf einer sehr engen Bahn die Erde umrundet, ohne mit dieser wieder zu kollidieren. Dies geschieht, indem vom Trümmerkern während des ersten Umlaufs von der Erde ständig Material 'abgesogen' wird und dieser als Folge permanent an die Erde herangezogen wird. Man könnte das als eine Art von 'Gummibandeffekt' bezeichnen. Der Kern fliegt also nicht entlang einer elliptischen Bahn sondern erfährt eine kontinuierliche Beugung der Flugbahn. Deshalb kollidiert er am Ende nicht wieder mit der Erde.

Wir können erkennen, dass das Material des kollidierenden Planeten rund um die Erde zerstreut wird und der Mond fast ausschliesslich aus Material des Fremdplaneten besteht. Die Erde bekommt einen zusätzlichen Impuls und Drall. Was in dieser sehr vereinfachten Simulation noch nicht berücksichtigt wird, ist die Bildung eines weit verstreuten Trümmerfeldes von Kleinmaterial im erdnahen Bereich, welches vom neuen Mond in seinen weiteren Umrundungen eingesammelt wird. Die vorerst niedrige Umlaufbahn des Mondes kann anschliessend durch Gezeiten-Effekte anwachsen, so wie das bis heute geschieht.

Der 9. Planet

Nachdem der frühere Planet Pluto aus der Liste der wirklichen Planeten ausschied und zu einem sog. Zwergplaneten degradiert wurde, besteht das aktuelle Sonnensystem nur noch aus 8 Planeten. Ausserhalb des letzten Planeten Neptun sind jedoch hunderte von weiteren Himmelskörpern bekannt, die meisten von ihnen allerdings kleiner als der Pluto. Die Bahnen dieser Körper verlaufen vollständig ausserhalb der Neptun-Bahn und ihre Umlaufzeit um die Sonne beträgt einige tausend bis einige zehntausend Jahre. Auf Grund von Bahnstörungen von 6 beobachtbaren dieser Himmelskörper, in der Abbildung violett dargestellt, kamen Astronomen zum Schluss, dass eine grosse Masse für die starke Bahnneigung und periodische Störungen der Flugbahn dieser Körper verantwortlich sein muss.

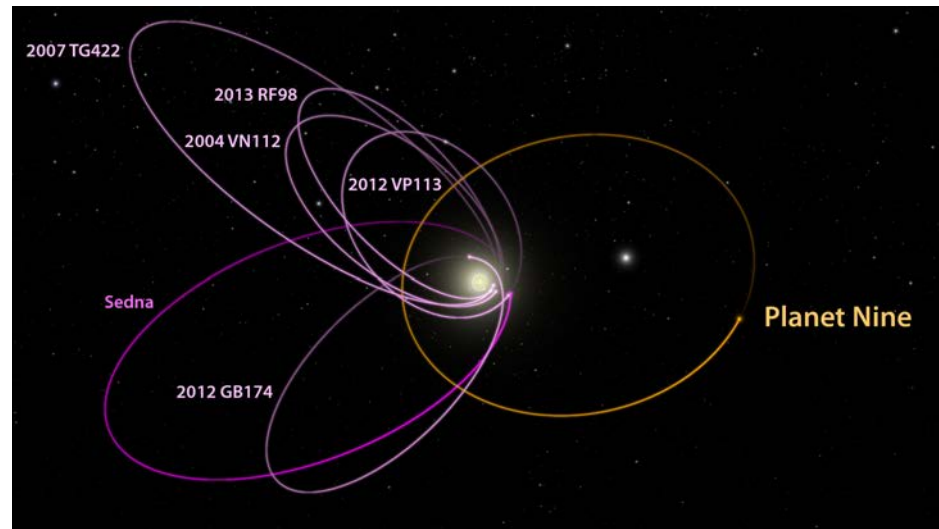


FIGURE 9. Sechs bekannte Himmelskörper (violett) und ein hypothetischer Planet (gelb). Der helle weisse Fleck im Zentrum stellt das gesamte Sonnensystem mitsamt allen Planeten und mit der Neptunbahn am äusseren Rand des weissen Fleckes dar. Bild: Caltech/R. Hurt, IPAC

Mit Computersimulationen wurden in der Folge Untersuchungen angestellt, um herauszufinden, welche Masse und welche Flugbahn ein hypothetischer 9. Planet haben müsste, um die Bahnen der anderen Körper zu verstehen. Mit einer grossen Anzahl von Simulationen mit ständiger Veränderung der Bahnparameter kam man schliesslich zum Schluss, dass ein Planet mit ungefähr 10 Erdmassen auf einer weit aussen liegenden Bahn die Beobachtungen erklären könnte. Der sonnennächste Punkt dieses hypothetischen 9. Planeten und seine aktuelle Position auf dieser Bahn wäre demzufolge allerdings so weit ausserhalb der Neptunbahn, dass eine direkte Beobachtung des reflektierten Lichtes sehr schwierig ist. Einige Astronomen gehen jedoch davon aus, dass dieser Planet in den nächsten 10 Jahren (Stand 2016) entdeckt werden wird.

Die Zukunft der virtuellen Realität

FIGURE 10. aus: www.presagis.com



In nicht allzu ferner Zukunft werden wir einen Spaziergang durch das antike Rom der Kaiserzeit machen können. Wir werden in eine dreidimensionale Rundum-Simulation eintauchen, in der wir den Kopf in alle beliebigen Richtungen drehen können. Wir werden durch das Forum Romanum gehen und dabei den Römern begegnen, die ebenfalls gerade unterwegs sind. Diese Römer sehen nicht nur fotorealistisch echt aus, sie bewegen sich auch ebenso real und weichen uns aus wenn wir mit Ihnen auf Kollisionskurs sind. Wir werden einen Römer, sofern wir des Latein mächtig sind, ansprechen und uns nach dem

Weg zum 'Circus Maximus' erkundigen können. Wir werden die Welt um uns herum mit all unseren Sinnen wahrnehmen, all das Gesprochene der Menschen, die Geräusche, mit der Nase den Geruch der antiken Stadt einatmen, mit den Fingern die kühle steinerne Sitzbank ertasten und den Luftzug des Windes auf unserer Gesichtshaut spüren. Es ist das 'Holodeck' mit einem Gesamterlebnis.

Heute gibt es bescheidene Ansätze die in diese Richtung gehen. Es handelt sich um drei-dimensionale Modelle welche versuchen Rom nachzubauen und wieder auferstehen zu lassen. Es sind aber noch relativ bescheidene, sterile, klinisch saubere, unbevölkerte, statische und räumlich eng begrenzte Modelle. Andererseits sind alle Kerntechnologien für ein umfassendes Erlebnis bereits vorhanden, zumindest in den Ansätzen. Die Spiele-Industrie spielt hier eine bedeutende Vorreiterrolle. und wird vielleicht auch das erste Marksegment werden, welches in diese Zukunft eintaucht.

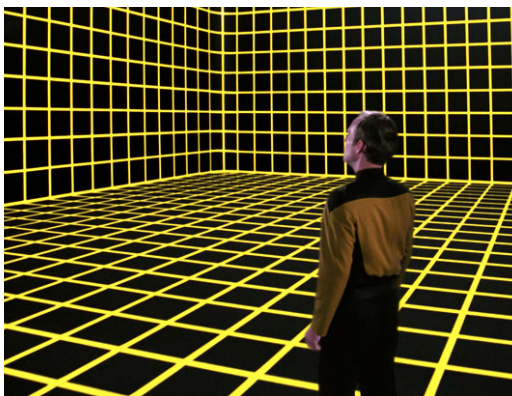


FIGURE 11. aus: www.startrek.com

Autonomes Fahren simulieren



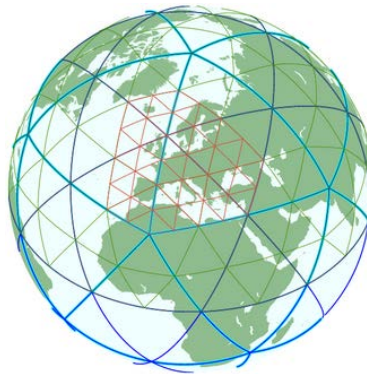
FIGURE 12. Bild von Volkswagen Deutschland

Die Technik des autonomen Fahrens hat in den letzten 10 oder 15 Jahren fast unglaubliche Fortschritte gemacht. Die amerikanische Forschungsinstitution DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) hat noch zu Beginn dieses Jahrhunderts Wettbewerbe für autonomes Fahren ausgeschrieben, an denen sich viele Universitäten und technische Forschungseinrichtungen beteiligten. Die Zielvorgabe bestand darin, ein autonomes Fahrzeug zu entwickeln welches von einem festgelegten Startpunkt in der Wüste der USA auf einer vorgegebenen Route selbständig möglichst weit fährt. Während die ersten Wagen bereits ein paar Meter nach dem Start ausschieden, weil sie das Gehege des Start-Areals umfuhren, erreichten die besten eine Distanz von wenigen Kilometern bevor sie irgendwo in einem Strassengraben endeten.

Heute, wo Autos bereits in der Lage sind mit hoher Sicherheit selbständig im dichtesten Verkehr durch Städte oder halb Europa zu fahren, besteht die Aufgabe der Autobauer immer mehr darin, den Systemen den letzten Schliff zu geben. Bevor autonome Autos auch von Gesetzes wegen als vollwertige Verkehrsteilnehmer zugelassen werden, muss die Automobilindustrie den Nachweis erbringen, dass ihre Autos in der Lage sind eine sehr grosse Kilometerzahl unfallfrei zurückzulegen. An diesem Punkt kommen die folgenden Technologien zusammen: die Simulation, der Supercomputer, der Grafikkartenhersteller (Stichworte: NVIDIA, GPU) und die Spiele-Industrie. Die gesamte Steuerungssoftware der autonomen Autos wird auf einem Supercomputer dazu gebracht, gespeicherte, fotorealistisch nachgebildete Landschaften virtuell zu befahren. So hat der Grafikkartenhersteller NVIDIA eine Simulationslösung entwickelt, welche in der Lage ist, in einer Stunde 90'000 Kilometer zurückzulegen. Das Auto fährt in diesem Sinn pro Stunde mehr als zweimal um die Erde. So ist ein Supercomputer angeblich in der Lage, das gesamte Strassennetz der USA in wenigen Tagen abzufahren und dabei dieselben Ergebnisse zu liefern wie sie ein reales Auto erbringen würde.

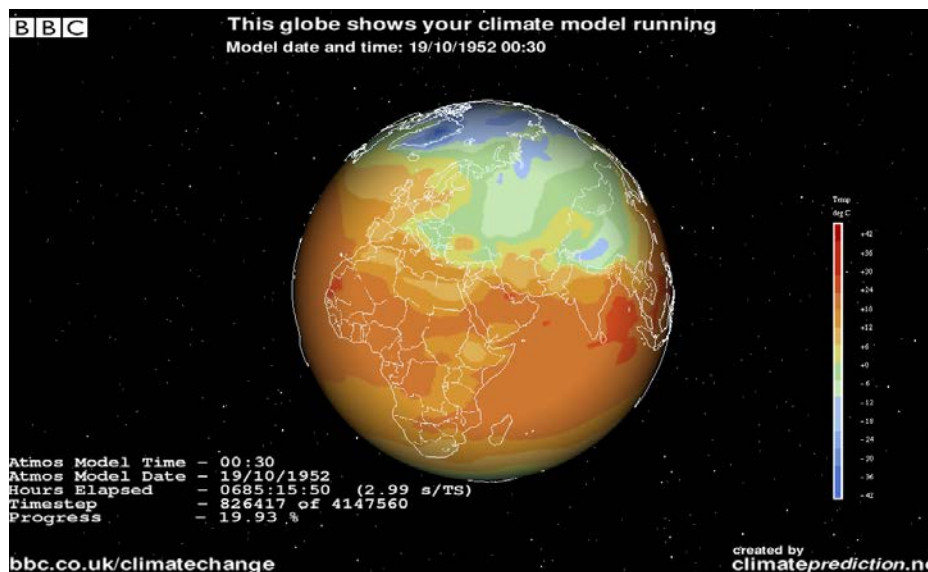
Das Wetter und das Klima simulieren

Die Wettervorhersage beruht heute weitgehend auf numerischer Simulation. Das Simulationsmodell besteht in der Regel aus einer heterogenen dreidimensionalen Netzstruktur welche die Globus-Oberfläche horizontal und vertikal überzieht. An Orten von besonderem Interesse, also dort wo die Vorhersage ihr Zielpublikum hat oder wo die Wetterphänomene sich auf engem Raum stark ändern können, wird die Netzstruktur sukzessive bis zu einer Maschenweite von einem Kilometer verfeinert. Die nebenstehende Abbildung zeigt dieses Vorgehen schematisch.



aus: www.mpinet.mpg.de

Mit Hilfe der 'Navier-Stokes'-Gleichungen wird anschliessend die Ausbildung und der Transport der physikalischen Grössen wie Luftdruck, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, usw. von jeder Zelle in ihre Nachbarzellen in kleinen Zeitschritten berechnet. Dieser Vorgang wird ständig iterativ wiederholt womit man sich in der Zeitskala vorwärtsbewegt und eine Prognose für den Zustand des Wetters in den nächsten Tagen bekommt. Da das Wetter physikalisch ein chaotischer Vorgang darstellt, ist die Kenntnis der Anfangsbedingungen zu einem bestimmten Zeitpunkt äusserst wichtig. Die Wettermodelle müssen also täglich mit dem realen beobachteten Wetter abgeglichen werden. Die Genauigkeit dieser Ausgangswerte ist anschliessend ein wichtiges Kriterium dafür, wie lange die berechnete Wetterprognose ihre Gültigkeit haben wird.



Klimamodelle funktionieren grundsätzlich gleich. Man rechnet in diesen Prognosen für die nächsten Jahrzehnte allerdings mit homogenen Netzstrukturen welche den ganzen Erdball einbeziehen und berücksichtigt dabei auch Einflussgrössen die langfristig zum Tragen kommen, wie z.B. die Konzentration von 'schädlichen' Gasen in der Atmosphäre, das Abschmelzen von Eismassen, usw.

Tornados simulieren



Im Technorama, einem Technikmuseum in Winterthur in der Schweiz, steht ein Tornadosimulator zum Anfassen. Durch die Einwirkung von genau gesteuerten äusseren Luftbewegungen am Boden, an der Decke und in den vertikalen Stangen entsteht in der zentralen und mit Rauch angereicherten Luftsäule eine Luftverwirbelung die einem Tornado nachempfunden ist. Diese äusseren Einwirkungen stimmen im Prinzip mit den grossräumigen Luftbewegungen im Umfeld eines wirklichen Tornados überein. So gesehen zeigt dieses Modell recht schön, wie ein Tornado prinzipiell entsteht.

Der Flugsimulator



Bereits während des ersten Weltkriegs kam mit der grossen Anzahl auszubildender Piloten das Bedürfnis auf, die Schulung auf dem Flugzeug zu beschleunigen und zu optimieren. Erste "Flugsimulatoren" erlaubten es, den Pilotenanwärtern die Grundlagen der Flugzeugsteuerung und die Folgen von

Steuerknüppel-Bewegungen bereits am Boden zu erfahren und zu erlernen.



Vor, während und nach dem zweiten Weltkrieg wurden ganze Generationen von Piloten am sog. Link-Trainer ausgebildet. Dieser Simulator war nicht zum Erlernen der Flugzeugsteuerung gedacht, sondern zum Üben des Blindflugs. Der Pilot hatte in einer geschlossenen Kabine, welche den Nachtflug simulierte, die Blindflug-instrumente vor sich, die im Hintergrund auch wirklich die laufende

Position berechneten und auf dem Instrumentenbrett die Richtung von Peilsendern anzeigten. Das Gerät war in der Lage, laufend mechanisch die Flugrichtung und Geschwindigkeit in die aktuelle Position des Flugzeuges aufzuaddieren. In der Regel wurde mit diesem Trainer das Ansteuern von Flugplätzen im Blindflug eingeübt. Auf einem Kartentisch der sich im gleichen Raum befand wurde mit einem x-y-Schreiber kontinuierlich die Position des Flugzeugs auf eine Karte aufgezeichnet. Der Fluglehrer und sein Schüler waren somit in der Lage, nach dem virtuellen Flug eine Beurteilung des Flugweges und des Anflugs zum Flughafen durchzuführen.

Moderne Flugsimulatoren bieten ein Flugerlebnis welches sich, zumindest visuell, kaum noch von der Wirklichkeit unterscheidet. Die Pilotenausbildung auf Linienflugzeuge wird heute zum grössten Teil auf Simulatoren durchgeführt. Die wirklichen Flüge schliessen die Ausbildung am Ende noch ab.

Der simulierte Windkanal



Bereits die Gebrüder Wright, welche 1903 in den Sanddünen von Kitty Hawk, USA, den ersten von Hand gesteuerten Motorflug durchführten, hatten während der Entwicklung ihres Flugapparates 'Flyer' einen einfachen Windkanal konstruiert um damit Messungen des Auftriebes an kleinen Flugmodellen durchzuführen.

Vor dem Computer-Zeitalter war der Windkanal die einzige Möglichkeit,

Strömungsuntersuchungen an neuen, noch nicht entwickelten Flugzeugen zu bewerkstelligen. Das Ziel war die Optimierung der Form der äusseren Hülle eines Flugzeuges unter Berücksichtigung sämtlicher Klappenstellungen und Auftriebshilfen. In solchen Messungen wurden letztlich die Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte bei unterschiedlichen Anstellwinkeln des Flugzeuges gegenüber der Luftströmung gemessen. Obwohl bis heute auf den eigentlichen Windkanal nicht verzichtet werden kann, werden immer mehr Aufgaben von sog. CFD-Simulationen übernommen (Computational Fluid Dynamics).

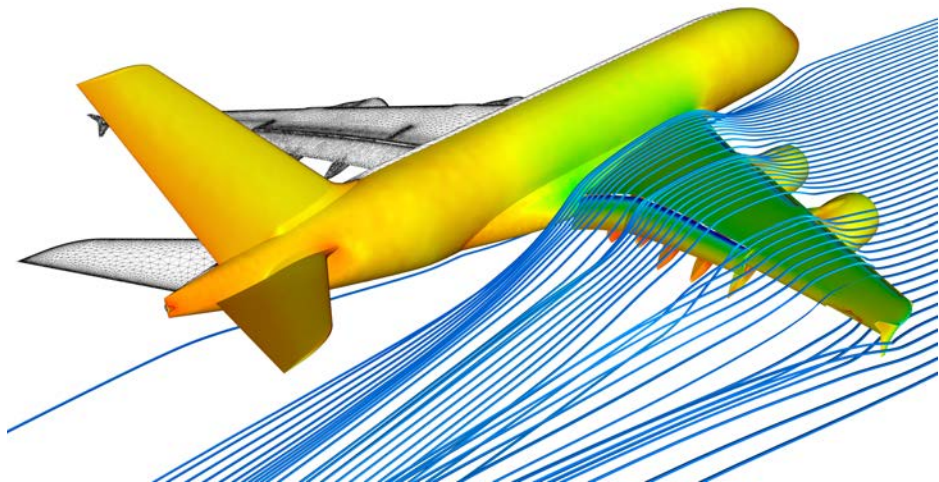


FIGURE 13. Airbus A380 Simulation. Quelle: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR.

In einer CFD Simulation wird eine äussere Flugzeughülle dargestellt durch eine komplexe Gitterstruktur, einer berechneten Strömung ausgesetzt, welche ebenfalls durch ein 3-dimensionales räumliches Gitter getragen wird und das Flugzeug vollständig umhüllt. Beide Gitterstrukturen sind räumlich fixiert und die virtuelle Luft wird anschliessend rein rechnerisch mit sog. Transportgleichungen durch die äussere Gitterstruktur hindurchbewegt. Bei diesem Vorgang wird die Luftströmung sehr realistisch nachgebildet. Auch die gesamte Druckverteilung auf die Flugzeughülle kann bei diesen Berechnungen ermittelt werden. Die Abbildung zeigt sowohl den Strömungspfad einzelner Luftpartikel (blau) als auch die Druckverteilung auf die Oberfläche des gesamten Flugzeuges (gelb, grün, rot). Die CFD-Methode wird heute auch für viele andere Simulationsaufgaben eingesetzt, wie die Luftströmung um Autos, Wolkenkratzer und ganze Stadtviertel, die Kühlung elektronischer Schaltungen und die Strömung in Turbinen, usw.



FIGURE 14. Belastungsversuch an einem Flügel des Typs Boeing 787 Dreamliner

Während der Entwicklung eines neuen Flugzeuges wird die maximale Belastbarkeit der einzelnen Komponenten, so auch der Flügel, mit geeigneten Simulations-programmen zur Strukturanalyse bis ins Detail berechnet. Der reale Flügel wird schliesslich entsprechenden Belastungstests unterzogen. Bei einem ersten Versuch wird der Flügel bis zum eigentlichen Bruch belastet. In der Regel wird dabei der doppelte Belastungswert der maximal denkbaren Auslenkung bzw. der maximal je zu erwartenden Biegebelast, für den der Flügel rechnerisch ausgelegt wurde, angestrebt. Der zweite Belastungstest ist ein Dauerversuch mit Wechselbelastungen wie sie im späteren Einsatz des Flugzeuges zu erwarten sind, Dabei wird der Flügel fortdauernd über Monate und Jahre hinweg wechselnden Belastungen ausgesetzt um allenfalls Ermüdungsbrüche an diesbezüglich besonders gefährdeten Teilen herbeizuführen. Bei einem erfolgreichen Abschluss dieser Versuche erreicht das Flugzeug in der Regel ein Mehrfaches seiner vorgesehenen Lebensdauer.

Heute sind diese Versuche Standard. Das war allerdings nicht immer so. In den Jahren 1953 und 1954 kam es beim ersten in Serie hergestellten Passagierstrahlflugzeug, der 'De Havilland Comet-1', zu mehreren unerklärlichen Abstürzen. Die Flugzeuge brachen während des Einsatzes in grossen Höhen auseinander. Intensive Untersuchungen am Boden mit Hilfe von Wechselbelastungen des Kabinendruckes führten schliesslich dazu, dass die Vorfälle nachvollzogen werden konnten. Eine 'zu eckige' Form der Kabinenfenster hatte unerwartet hohe Spitzenbelastungen in den Ecken der Fenster zur Folge, was nach einer gewissen Belastungszeit zu Rissen führte und schliesslich mit dem Auseinanderbrechen des Rumpfes endete.



FIGURE 15. De Havilland Comet-1

Gesichter erkennen

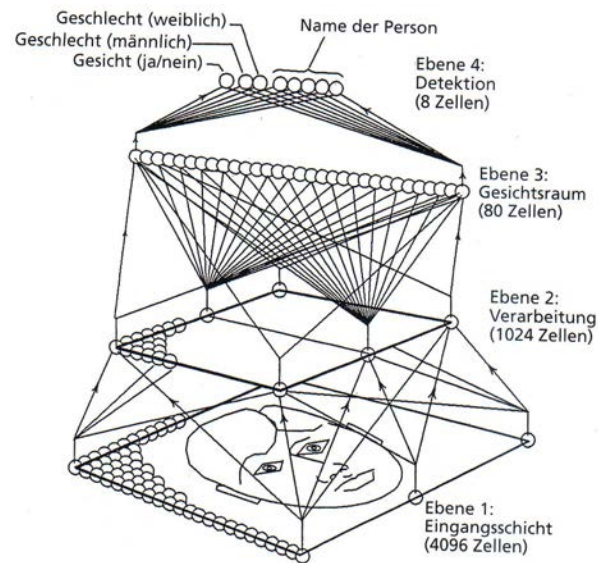


FIGURE 16. aus: Die Seelenmaschine, eine philosophische Reise ins Gehirn von Paul M. Churchland.

Mit Hilfe von sog. neuronalen Netzen ist man in der Lage die Grenzen der reinen digitalen Datenverarbeitung mit ihrer Ja-Nein-Logik zu überschreiten. Neuronale Netze können allerdings auf Digitalcomputern simuliert werden. Die nebenstehende Abbildung zeigt schematisch den Aufbau eines neuronalen Netzes zur Gesichtserkennung. Neuronale Netze sind aus mindestens drei, oft auch aus vier oder noch mehr

Ebenen aufgebaut. Jede Ebene besteht aus einer zweidimensionalen Schicht von Neuronen. Ein Neuron ist eine logische Einheit welche nicht nur die Werte 0 oder 1, sondern auch alle Werte dazwischen einnehmen kann. Die erste Schicht bzw. die Eingabeschicht ist in unserem Beispiel das Abbild eines Gesichtes. Die Schicht besteht z.B. aus 64×64 Pixel bzw. Neuronen, wobei jeder Pixel einen Helligkeitswert zwischen 0 und 1 einnehmen kann. Jedes Neuron gibt seinerseits ein Signal an die verdrahteten Neuronen in der nächsten Schicht weiter, falls seine Aktivierung einen festgelegten Wert zwischen 0 und 1 überschreitet. Diese Einstellungen an den Neuronen sind aber nicht fest. Man kann sich vorstellen, dass sich an jedem Neuron eine Art von 'Potentiometer' befindet, welches die Empfindlichkeit des Neurons verändern kann. Im Weiteren kann die Summe aller Einstellungen an den Neuronen vom System mit entsprechenden Funktionen automatisch verändert werden, indem man die Apparatur mit konkreten Lösungen trainiert. Es ist eine Eigenart neuronaler Netze, dass sie erst dann richtig funktionieren nachdem sie eine Trainingsphase durchlaufen haben. Ein neuronales Netz kann letztlich auch nur die Gesichter wiedererkennen, auf welche es bereits trainiert wurde.

Interessant ist die Art und Weise wie die neuronalen Netze letztlich in der Praxis funktionieren. Im abgebildeten Netz ist für jede Person ein Ausgabe-Neuron vorgesehen. Zeigt man der Apparatur das Gesicht Nr. 'k', dann leuchtet am Ende die Lampe Nr. 'k' auf, falls das Netz bereits gut trainiert wurde. Neuronale Netze geben allerdings immer eine Antwort. Sie sind wie kleine Kinder. Die Frage ist lediglich ob die Antwort richtig oder falsch ist. Dies hängt davon ab, wie gut das neuronale Netz bereits trainiert wurde. Zeigen wir dem Netz ein neues Gesicht, welches das Netz noch nie vorher gesehen hat, dann wird es uns als Antwort mitteilen, dass dies das Gesicht Nr. 'j' sei. Wahrscheinlich deshalb, weil das Gesicht Nr. 'j' dem gezeigten Gesicht am nächsten kommt. Und dies ist auch eine interessante Antwort, zu welcher ein rein binärer Denkvorgang nicht ohne weiteres fähig wäre. Aus diesem Grund kann das Netz das ihm bekannte Gesicht auch dann richtig erkennen, wenn wir ihm ein Foto des Gesichtes aus einer leicht anderen Richtung zeigen.

Auch interessant ist das Herauslesen des Inhalts einer Zwischenschicht. Im oben zitierten Buch wird dies an einzelnen Positionen gemacht und der Inhalt bildlich

dargestellt. Es handelt sich im eigentlichen Sinn um furchterregende, geisterhafte Gesichter. Wahrscheinlich befinden sich in den verborgenen Zwischenschichten unseres Gehirns auch solche Zwischenformen von Gesichtern, die uns dazu dienen, Gesichter effizient und platzsparend zu speichern. Der Mensch kann Gesichter nicht als ganze Einheiten speichern, dies wäre viel zu speicherintensiv. Aus diesem Grund können wir auch Gesichter die uns bestens bekannt sind, wie das der Mutter oder der eigenen Frau, nicht annähernd erkennbar auf ein Blatt Papier skizzieren, es sei denn man ist ein wahrer Künstler. Wahrscheinlich hat die Evolution den Vorgang der Erkennung von Gesichtern weitgehend optimiert, indem sich der Mensch ein durchschnittliches Gesicht gemerkt hat und sich bei jeder neuen Person die er kennenlernt die Differenzen zu diesem zentralen Urgesicht speichert. Vielleicht ist in unserem Gehirn auch eine Gruppe von Gesichtern gespeichert, je eines für verschiedene Menschentypen? Es ist auch möglich, dass nur einzelne Gesichtsteile in der Art eines Baukastensystem gespeichert werden? Diese Urgesichter müssen nicht zwangsläufig schöne glatte und ansehnliche Formen haben. Diese Gesichter können durchaus eine schwer zu beschreibende abstrakte Variante eines Gesichtes sein, welches sich beim Nachdenken gut und optimal kombinieren lässt. Es können durchaus geisterhafte Gesichtsformen sein. Ebenso möglich, dass diese normalerweise verborgenen Speicherformen von Gesichtern bei hohem Fieber an die Oberfläche gelangen.

Blue Brain Project

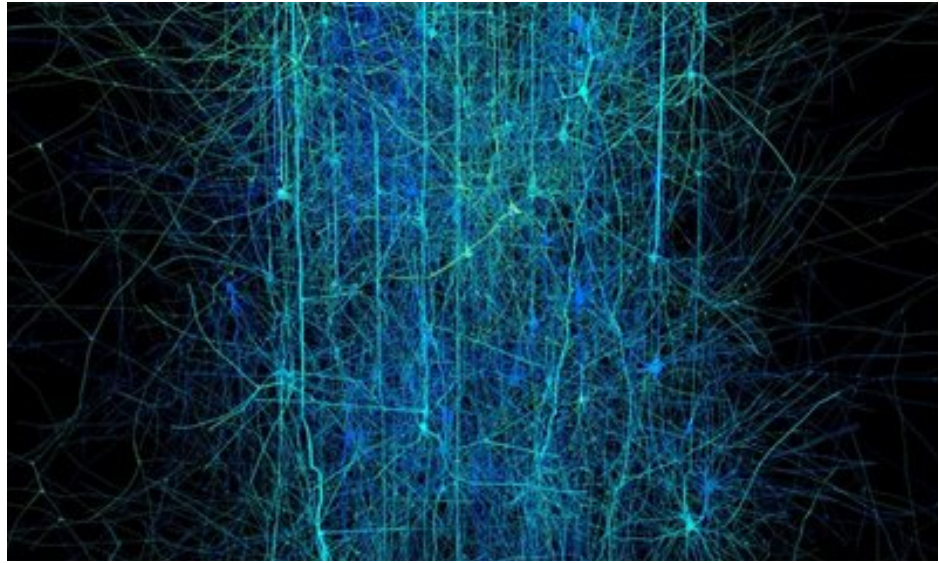


FIGURE 17. <http://bluebrain.epfl.ch/>

Das sog. Blue Brain Projekt unter der Leitung von Prof. Makram an der EPFL in Lausanne, Schweiz versucht nicht weniger als das menschliche Gehirn auf einem Computer zu simulieren. Man will mit diesem Projekt ein Gehirn Stück für Stück nachbauen. Nach gewissen Vorarbeiten begann 2005 die Zusammenarbeit mit IBM welche dem Projekt einen Supercomputer des Typs 'Blue Gene' zur Verfügung stellten. Für ein Projekt mit den gestellten Ansprüchen ist die Rechenleistung absolut kritisch und entscheidend für einen Erfolg. In den anschliessenden Jahren analysierten die Wissenschaftler erfolgreich eine einzelne neuronale Säule aus dem Neocortex einer Ratte und übertrugen das 'Schaltschema' sinngemäss auf den Computer. Dabei besteht die äussere Hirnrinde bei der Ratte aus ca. 100'000 solcher Säulen mit je ca. 10'000 Neuronen. Beim Menschen ist die Grössenordnung für beide Zahlen nochmal mindestens ein Faktor 10 höher. Man erwartet aus den Resultaten einen hohen Nutzen nicht nur in der Medizin und Biologie, sondern speziell auch in Wissenschaften wie der Computertechnik, Informatik und Mathematik. Speziell auch in der Softwaretechnologie dürften durch das Verständnis der inneren Verdrahtung und Funktionsweise von grossen bis sehr grossen neuronalen Netzstrukturen neue Impulse gewonnen werden.

Nachdem die Technologie der künstlichen neuronalen Netze, was die Komplexität betrifft, sich in den letzten 20 bis 30 Jahre kaum oder nur bescheiden weiter entwickelte, ist 'Blue Brain' das erste Projekt, welches einen wirklich dramatischen Sprung in die Zukunft versucht. Im Jahre 2013 erhielt das Projekt von der EU-Kommission den Zuschlag von ca. 1 Milliarde Dollar und den Status eines der beiden wichtigsten Projekte in der EU-Forschung zu sein.

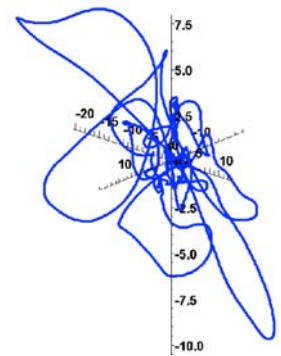
Das Projekt hat deshalb europaweit auch viel Missstimmung und Neider hervorgebracht. Kritiker geben vor, dass viele andere Bereiche in der neuronalen Forschung durch diese Konzentration zu wenig berücksichtigt würden und dass die Ziele des Projektes unrealistisch hoch gesteckt seien. Wenn das Projekt allerdings auch nur 10% seiner gesteckten Ziele erreicht, dann ist damit wahrscheinlich mehr gewonnen als wenn das Geld nach dem Giesskannenprinzip vergossen würde. Wer Grosses erreichen will muss auch Grosses wagen.



FIGURE 18. Gross-Simulation eines Gebäudes auf einem Erdbebensimulator in Japan

Japan muss mit Erdbeben leben. Es gehört zu den Ländern an der Kante einer grossen Erdplatte die ständig in Bewegung ist. Die Erdbebenforschung hat in Japan Tradition, sowohl experimentell als auch mit numerischen Simulationen. Das starke Erdbeben von Kobe im Jahre 1995 hat den Willen zu grösseren Anstrengungen noch weiter gefördert. Japan ist in Sachen Erdbeben heute das führende Land auf der Welt und nimmt die Gefahren wie kein anderes Land sehr ernst. Alle Neubauten unterliegen in Japan strengen gesetzlichen Auflagen und müssen den Nachweis hoher Erdbebensicherheit erbringen. Dies gilt sowohl für Häuser als auch für öffentliche Bauwerke wie Brücken, Eisenbahnanlagen, usw.

Allerdings ist die numerische Simulation von Häusern unter dem Einfluss von Schwingungen sehr anspruchsvoll. Dies aus mehreren Gründen. Zum einen ist das Bewegungssignal des Untergrunds während einem Erdbeben keine gerichtete Anregung sondern eine mehr oder weniger chaotische 3-dimensionale Raumbewegung. Auch wenn die Amplituden und die Frequenzen in etwa bekannt sind, so ist der genaue Verlauf dieser Raumbewegung natürlich bei jedem Erdbeben wieder anders. Eine bestimmte räumliche Bewegung kann bei einem Gebäude zum Einsturz führen, während das Haus daneben die Schwingung gut übersteht. Wäre das Schwingungssignal in einem anderen Erdbeben zufällig gleich stark aber räumlich unterschiedlich, dann könnte die Wirkung anders verlaufen. Zweitens sind Gebäude mit tragenden Stahlstrukturen statisch gut zu definieren, während solche in reiner Steinbauweise schwieriger zu modellieren sind. Beton wiederum ist ein Baustoff der praktisch keine Zugfestigkeit hat und immer auf Druck beansprucht werden sollte. Bei Zugbelastung müssen die Armierungen die Kräfte übernehmen. Diese können das aber nur solange, wie der Beton um die Armierung herum intakt bleibt.



3D-Verlauf der Bodenverschiebung des Erdbebens von Kobe 1995 in [cm].
(Thomas Wenk, Erbeben-Ingenieurwesen und Baudynamik GmbH Zürich)

Die Entwicklung der Rechengeschwindigkeit

Die Rechenleistung ist für die numerische Simulation ein absolut zentrales Thema. Sie ist einfach immer zu gering. Wer simuliert denkt immer wieder "Wäre schön, wenn das Sekunden statt Tage dauern würde".

Wir gehen zurück in das Jahr 1984. Der Autor der sonar-Software hatte Zuhause einen Apple-II Computer und entwickelte in der Firma Oerlikon Bühler AG in Zürich mit einer VAX-11/780 Computeranlage das Simulationsprogramm 'ALIEN'. Die Kollegen in Los Alamos (New Mexico, USA), welche sich mit der Entwicklung ähnlicher Programme befassen, waren besser ausgerüstet. Sie besaßen den legendären CRAY-1 Computer, den schnellsten Rechner der Welt. Von dessen phänomenaler Computerleistung konnte man nur träumen und sich vorstellen, was alles möglich wäre, hätte man einen solchen Rechenboliden (damaliger Kostenpunkt um die 8 Millionen Dollar). Im Logbuch zum Programm 'ALIEN' wurde 1984 der folgende gemessene Vergleich für die Bewältigung einer bestimmten einfachen Simulationsaufgabe (Benchmark Programm) eingetragen:

- 1 Mann Handarbeit : 3000 Jahre
- MARK-1 Computer 1944 : 40 Jahre
- Apple II Computer : 2.5 Tage
- VAX-11/780 Computer : 3 Stunden
- Cray-1 Computer : 40.2 Sekunden

Wir machen nun einen Sprung von 26 Jahren vorwärts in das Jahr 2010. Was der Autor der sonar Software unter seinem Schreibtisch hat, hat alle Erwartungen übertroffen. Die Rechengeschwindigkeit einer Workstation hat die 10'000-fache Leistung der VAX-11/780 Anlage von damals. Dieselbe Simulationsaufgabe aus dem Jahr 1984 dauert jetzt auf dieser Workstation genau 1 Sekunde. Das ist die 40-fache Leistung des Cray-1 Computers. Nach dem Jahr 2010 geht die Entwicklung der Rechenleistung etwas andere Wege. Die Anzahl Rechenkerne entscheidet nun über die absolute Simulationsgeschwindigkeit der Multiprocessing-fähigen Software wie 'sonar'. Damit ist nochmals ein Leistungssprung gegenüber dem Jahr 2010 gemacht. Wir bleiben dran.

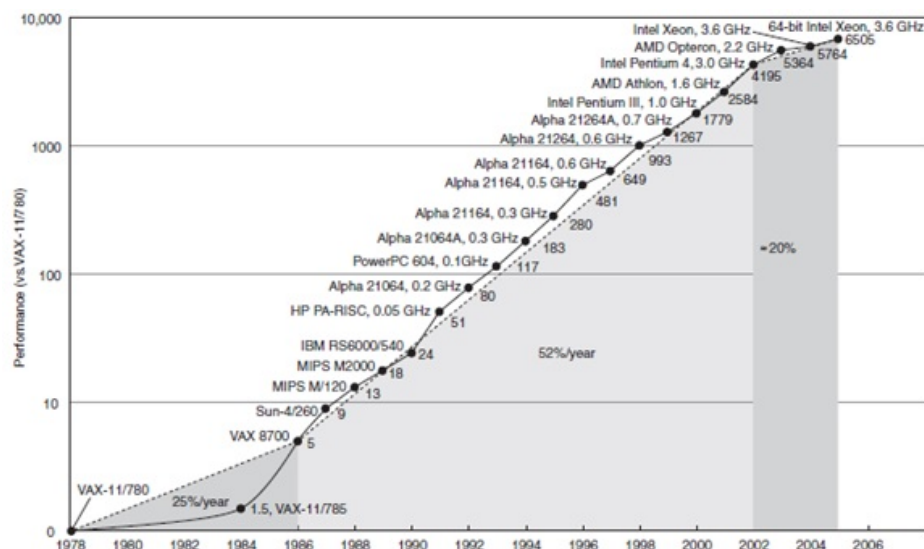


FIGURE 19. Relative Rechenleistung von Mikroprozessoren zum Computer VAX-11/780

Bionisch simulieren

Bionik heisst die Disziplin, Ideen und Lösungen zu bestimmten Problemen der Natur abzuschauen und technisch umzusetzen und sich von der Natur inspirieren zu lassen um technische Konstruktionen zu optimieren. Eine klassische Aufgabe zu diesem Thema heisst, die Form eines mechanischen Bauteils im Hinblick auf Form und Gewicht so zu optimieren, dass das Bauteil den aufgetragenen Belastungen mit minimalem Gewicht standhält. Dazu gibt es heute Simulationsprogramme welche diese Aufgabe fast automatisch erfüllen können, indem sie das betreffende Bauteil mit einer gegebenen Last beanspruchen und in der Folge überall dort wo die Belastungen zu hoch werden etwas Material ansetzen und umgekehrt dort wo sie klein genug sind, etwas Material wegnehmen. Wenn diese Algorithmen konsequent und iterativ umgesetzt werden, dann entstehen Strukturen welche uns vom menschlichen Knochenbau her bekannt sind. Das ist weiter nicht verwunderlich, denn die Natur arbeitet genauso. Das Problem, welches wir bis heute mit diesen optimierten Strukturen haben, ist deren Umsetzung. Solchermassen optimierte Bauteile sind nicht einfach herzustellen. Meistens war dazu eine Reihe von konstruktiven Kompromissen notwendig, welche wieder einen Teil des Designs zerstörten. Aber die neuste technische Entwicklung hat auch für dieses Problem eine Lösung parat: den 3D-Drucker. Zusammen mit der Bionik sind das zwei Technologien welche fast ideal zusammenpassen.



Das Beispiel zeigt den Prototyp eines optimierten Scharniers einer Türe an einem Airbus Flugzeug, hergestellt durch additives Sintern von Titan auf einem 3D-Drucker. Diese Anwendung mag von seinem Nutzwert her gesehen vielleicht noch nicht vollständig zu überzeugen, denn so viele Türscharniere gibt es nicht an einem Flugzeug. Stellen Sie sich aber vor, dass Sie an einem Flugzeugsitz dank der neuen Technologie Gewichtseinsparungen von lediglich 250 g erreichen könnten. In einem Flugzeug mit 400 Passagieren entspricht das einer Gewichtseinsparung von 100kg. Dieses Gewicht kann direkt in eine entsprechende Treibstoffeinsparung umgerechnet werden welche sich auf ein Jahr hochgerechnet auf einen grossen Geldbetrag summiert.

Wolkenkratzer simulieren



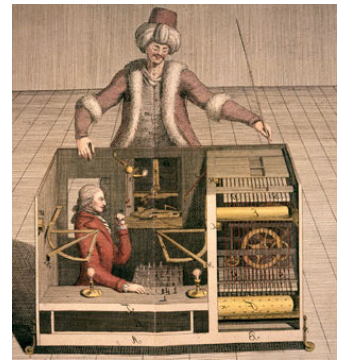
In der Dokumentation mit dem Titel 'Schöne neue Welt' des Zweiten Deutschen Fernsehens (ZDF, 2016) erklärt Carl Bass der Firma Autodesk dem Fernsehmoderator Claus Kleber wie ein Wolkenkratzer in der Skyline von Shanghai, China, geplant wurde. Der geschwungene Turm ist das Resultat von 100'000 Stunden Computersimulation, welche zum Ziel hatte, mit möglichst wenig Material ein Gebäude zu errichten welches der Windbelastung wenig Angriffsfläche bietet und durch die verdrehten Kanten gleichzeitig aerodynamisch schwingungsarm ist. Im Weiteren wurde der gesamte Energiehaushalt des Gebäudes minimalisiert.



FIGURE 20. Das Bild zeigt das Gebäude im Bau

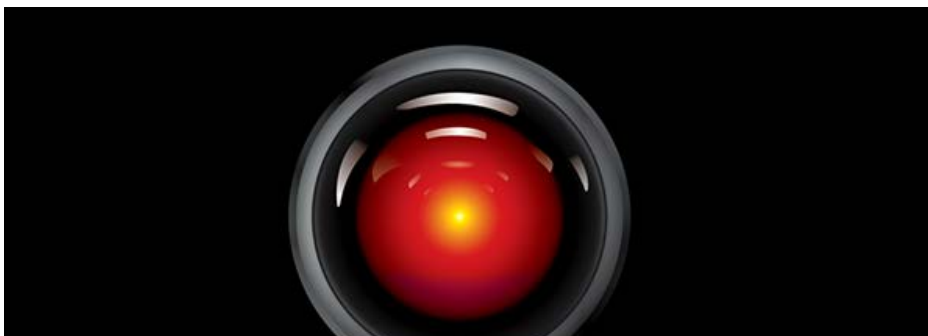
Der getürkte Simulator

Im Jahre 1769 stellte der Mechaniker Wolfgang von Kempelen einen mechanischen Schach-Automaten vor, der angeblich in der Lage war selbständig auf hohem Niveau Schach zu spielen. Der Automat bestand aus einer Truhe vollgepackt mit Hebelgetrieben, Zahnrädern und dem Oberteil eines menschlichen Androiden, welcher ebenfalls über Hebelsysteme die Spielfiguren auf dem Schachbrett bediente. Der Android war in eine türkische Tracht gekleidet, weshalb man das Ganze den 'Schachtürken' nannte. Weil man die Zuschauer erfolgreich glauben machte, dass die ganze Apparatur selbständig arbeitete, war das Gerät eine wahre Sensation welche in ganz Europa vorgeführt wurde. Es fanden sogar Spielpartien am Hofe zu Wien und gegen Friedrich den Grossen in Potsdam statt. Auch Napoleon soll gegen den Türken gespielt haben. Weil der Besitzer des Gerätes einzelnen Leuten auch Einblick in die geöffnete Apparatur gewährte, war nicht offensichtlich, dass sich in Tat und Wahrheit jeweils ein menschlicher Schachspieler in der Truhe befand. Vielleicht deshalb, weil die für den Spieler vorgesehenen offenen Bereiche in der Truhe auf raffinierte Weise mit verschiebbaren Hebeln verbaut werden konnten, so dass kein Platz für einen Menschen erkennbar war. Das Geheimnis um den türkischen Schachspieler wechselte mehrmals seinen Besitzer und hielt sich fast 70 Jahre bis ins Jahr 1838, als erstmals der dringende Verdacht aufkam, dass sich ein Mensch in der Apparatur befinden müsse. Was von dieser Geschichte blieb, ist die Bezeichnung 'getürkt'.



130 Jahre später, als die Zuschauer 1968 nach der Filmvorführung von '2001 Odyssee im Weltraum' das Cinerama Kino 'Apollo' in Zürich verliessen, entstanden sofort Diskussionen über die Realisierbarkeit all dieser Vorhersagen die der Film eindrücklich darstellte. Man hörte Sätze wie "Ich kann mir gut vorstellen, dass alles was in diesem Film gezeigt wird, früher oder später Realität werden wird. Nur eines kann ich mir nicht vorstellen: Dass ein Computer jemals Schach spielen kann". Das war einfach zu abgehoben. 'Schach', das war der ultimative Massstab für menschliche Intelligenz und Kreativität. Schach war die höchste Hürde des menschlichen Denkens die man sich damals vorstellen konnte. Schach spielen zu können hiess, von den geistigen Fähigkeiten her gesehen, Mensch zu werden.

Zwölf oder vierzehn Jahre später spielte man auf dem Apple II Computer gegen das Schachprogramm 'Sargon' und hatte, wenn man nicht ein sehr guter Spieler war, auf den höheren Schwierigkeitsstufen bereits Mühe zu gewinnen. Im Jahr 1996 gewann der von IBM entwickelte Computer mit dem zugehörigen Schachprogramm 'Deep Blue' gegen den amtierenden Weltmeister Garri Kasparov eine unter regulären Wettkampfbedingungen durchgeführte Schachpartie. Ein Jahr später gewann das Programm sogar ein ganzes Schachturnier über sechs Runden. 'Deep Blue' war 'de facto' somit Weltmeister im Schach. Kasparov, der vor diesen historischen Spielen mehrmals versicherte, dass er nie von einer Software geschlagen werde, musste eingestehen, dass der Computer, wie er es nannte, wie ein kleiner Gott gespielt hatte.



Mondflug Simulatoren



Auf den historischen Mondflug im Jahre 1969 haben sich die Astronauten mit einer ganzen Reihe von speziellen Simulatoren vorbereitet. Für jede Phase des Fluges waren entsprechende Anlagen konstruiert worden. Zu den wichtigsten gehörte der eigentliche Abstiegs-Simulator, mit dem der Flug aus der Mondumlaufbahn bis zum Aufsetzen geübt werden konnte. Da der Treibstoffvorrat sehr knapp bemessen war, konnte mit diesem Simulator die bestmögliche Einteilung des Triebwerkschubes während dem Abstieg eingeübt werden.



Mit dem sog. 'Lunar Landing Research Vehicle', auch bekannt unter dem Namen 'fliegendes Bettgestell', übten die Astronauten die allerletzte Phase vor der eigentlichen Landung. Das 'LLRV' hatte dieselben Flugeigenschaften wie das reale Mondlandefahrzeug und simulierte auf automatische Weise die reduzierte Gravitationskraft des Mondes. Neil Armstrong, der erste Mensch auf dem Mond, stürzte übrigens bei einem Übungsflug mit diesem Gefährt wenige Wochen vor dem eigentlichen Mondflug ab und musste sich mit dem Schleudersitz retten.



Die wirksame Gravitationskraft auf einen Menschen auf dem Mond beträgt ca. $\frac{1}{6}$ der Anziehungskraft der Erde. Ein besonders einfallsreicher Simulator diente dem Einüben des Spazierens und Hüpfens auf dem Mond bei reduzierter Gravitationskraft. Ein an langen Seilen aufgehängter Astronaut mit dem richtigen Seilwinkel von ca. 9.5° simulierte auf perfekte Art das Gewicht mit dem dieser auf dem Mondboden stand. Mit diesem Simulator waren sogar Sprünge mit Überschlägen möglich.

Schwerelosigkeit simulieren

Um sich vom Einfluss der Erdanziehung zu lösen und wirkliche Schwerelosigkeit zu simulieren gibt es folgende Möglichkeiten:

- sich in eine Erdumlaufbahn begeben (Erdsatellit)
- Parabelflug mit einem Flugzeug
- Fallturm

In Bremen, Deutschland steht seit 1990 ein Fallturm, welcher für die Untersuchung von kurzzeitigen Experimenten mit einer Schwerelosigkeit hoher Qualität gebaut wurde. In einer evakuierten Röhre wird eine Instrumentenkapsel aus einer Höhe von 110m fallen gelassen und am Ende in einem mit Styropor gefüllten Behälter zerstörungsfrei abgefangen. Die Fallzeit beträgt 4.74 Sekunden. Die Experimentieranlage wurde später mit einer Katapultanlage erweitert, so dass die Kapsel zuerst vom Erdboden in die Höhe geschleudert wird. In diesem Fall erreicht man eine Schwerelosigkeit von über 9 Sekunden.



FIGURE 21. Der Fallturm in Bremen. Bilder ZARM (Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation).

Die Forschungsanlage in Bremen wird für ein grosses Anwendungsgebiet eingesetzt. Dazu gehören Experimente aus den Wissenschaftsbereichen wie Astrophysik, Biologie, Chemie, Verbrennungsforschung, Strömungsmechanik, Fundamentalphysik, Materialwissenschaften, usw. Viele wissenschaftlichen Experimente können auf diese Weise frei von äusseren Gravitationseinflüssen in einer grundlegenden Form durchgeführt werden, was oft zu neuen Erkenntnissen führt. Im weiteren werden mit diesen Falltests einzelne Komponenten von Satelliten vor ihrem wirklichen Einsatz im Weltraum auf ihre Funktionstüchtigkeit in der Schwerelosigkeit getestet.

Den freien Fall simulieren

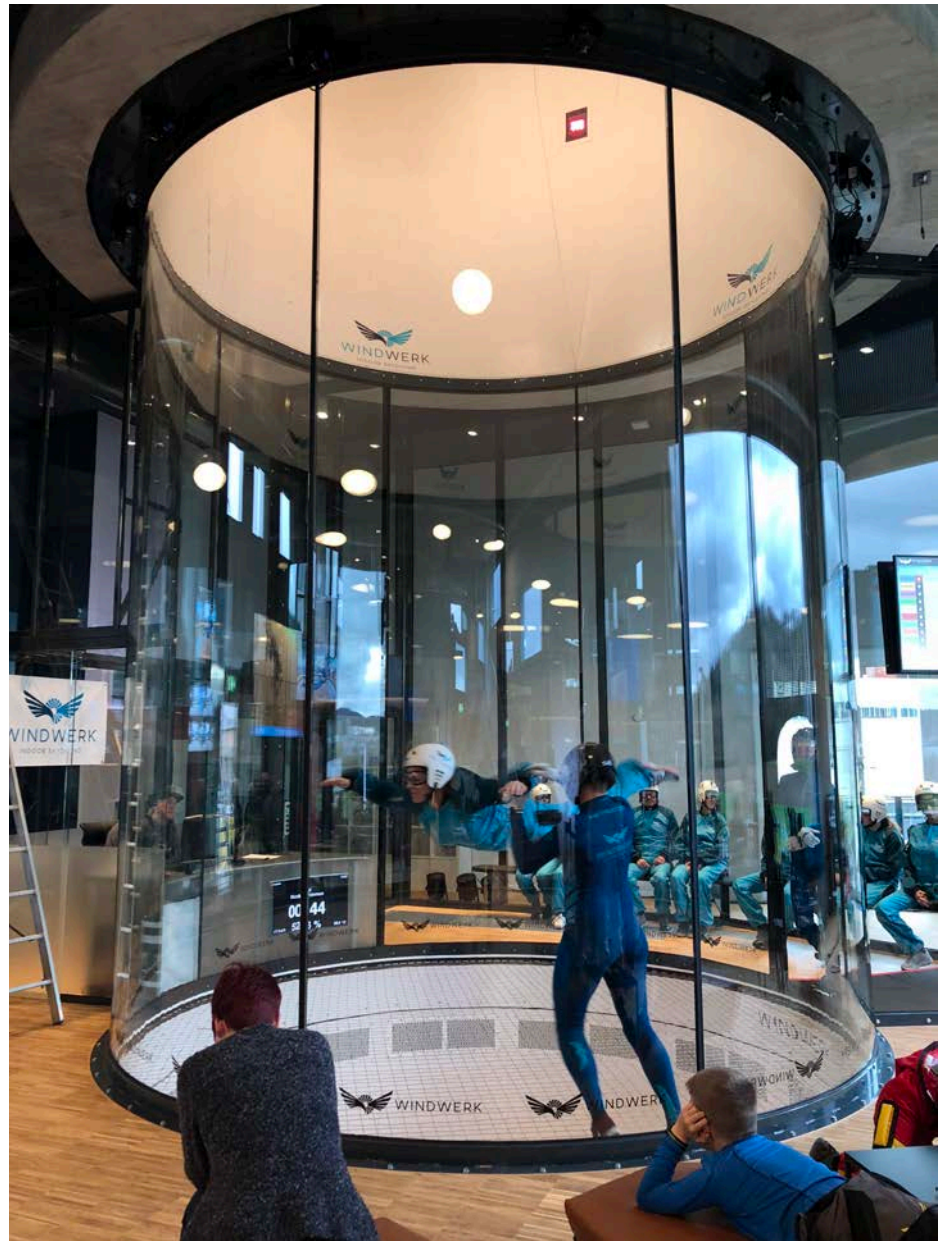


FIGURE 22. Windwerk Winterthur Schweiz

In Winterthur in der Schweiz haben wir die Möglichkeit den freien Fall in einem vertikalen Windkanal am eigenen Leibe zu erfahren bzw. zu erfiegen. Ein Luftstrom mit einer Geschwindigkeit von 250 bis 300 km/h, wie man ihn im freien Fall bei einem Fallschirmsprung erlebt, wird hier mit einer starken Windmaschine in einem geschlossenen Kanal erzeugt. Im vertikalen Teil des Strömungskanal befindet sich die abgebildete Glasröhre in welche der Springer durch einen seitlichen Zugang hineingelangt.

Crash Test Dummies

Im Jahre 1949 entwickelte die US Air Force zum Zweck des Tests von Schleudersitzen in Flugzeugen die ersten modernen Dummies. Zuvor wurde diese Aufgabe jeweils von freiwilligen Akteuren wahrgenommen, welche damit bei jedem Versuch mit Ihrem Leben spielten. Der Amerikaner John Paul Stapp erlangte Berühmtheit mit seinen Beschleunigungstests auf Raketen-schlitten bei der Erforschung der maximal möglichen Beschleunigung die ein Mensch aushalten kann. Sein Gesicht hatte nach diesen Versuchen manchmal das Aussehen eines Boxers der über fünfzehn Runden zusammengeschlagen wurde. In einem seiner spektakulären Tests liess er sich in einem Raketenschlitten von einer Geschwindigkeit von über 1000 km/h in sage und schreibe 1.4 Sekunden auf Null abbremesen und erlitt dabei, mit dem Gesicht in Fahrtrichtung, eine Beschleunigung bis zu 46 g.

Moderne Dummies, wie sie häufig bei Crash Tests in der Automobilindustrie eingesetzt werden, sind technisch hochstehende Apparaturen mit ausgefeilten Messvorrichtungen und vollgestopft mit Sensoren und Aufzeichnungsgeräten jeder Art. In Simulationsprogrammen wie 'sonar' werden gleichwertige virtuelle Dummies ein-gesetzt um dieselben Vorgänge zu simulieren und die Einflüsse, Beschleunigungen und Kräfte auf menschliche Körper und Körperteile zu messen und zu analysieren. In diesem Zusammenhang werden auch Dummies von Kindern und Säuglingen eingesetzt um entsprechende Tragtaschen und ihre Befestigungsmöglichkeiten im Auto unter realen Bedingungen zu erproben.



Simulierter 'Car Crash'

Was die Kombination von realer Simulationstechnik und numerischer Simulation auf dem Computer betrifft, ist die Automobilindustrie eine der fortschrittlichsten und führenden Anwender dieser Technologie. Nach Berichten von Honda dauerte die Entwicklung des sehr detaillierten virtuellen Modells, wie abgebildet, ca. ein halbes Jahr. Allerdings können mit diesem Modell, wenn es denn einmal steht, beliebig viele unterschiedliche crash-Szenarien simuliert werden. Selbst der Einfluss der Variation von einzelnen Teilen auf das Gesamtergebnis können auf diese Weise eingehend untersucht werden. Dies ist übrigens eine der grossen Stärken der numerischen Simulation. In dieser können kleine Veränderungen ganz gezielt unter sonst 100-Prozent identischen Bedingungen untersucht werden, was in der Realität kaum möglich ist. Da reale Tests teuer sind, geht man heute erst nach erfolgter Optimierung auf dem Computer in die reale Testphase. In den realen Tests müssen die gewonnenen Erkenntnisse und Resultate dann am Ende nur noch mit ein paar wenigen Tests bestätigt bzw. verifiziert werden.



Simulation Postprocessor

HONDA
The Power of Dreams

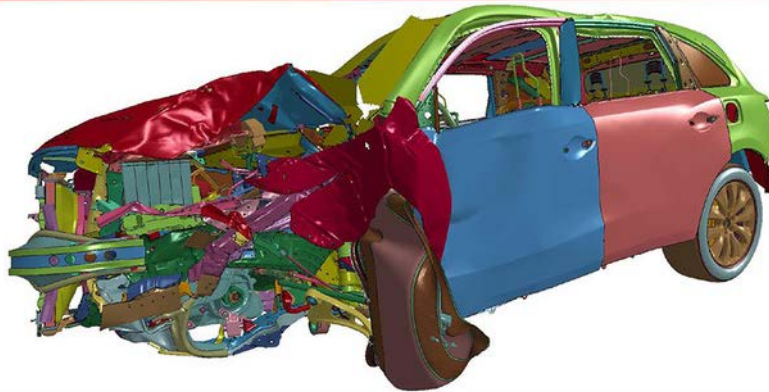


FIGURE 23. Automotive Savety Simulation, Honda R&D Americas, Inc.

Simulations-Spiele



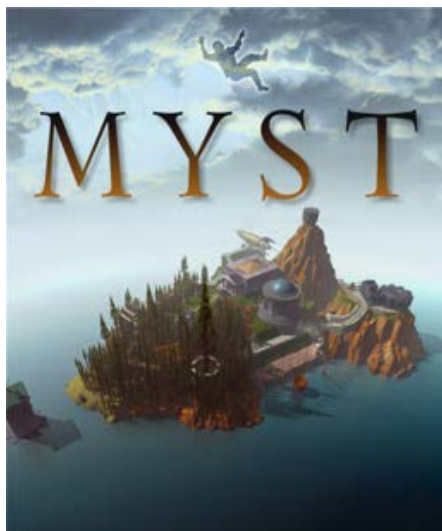
Gegen Ende des letzten Jahrhunderts erschienen eine ganze Reihe von Computerspielen unter dem Kürzel 'Anno' wie zum Beispiel 'Anno 1602'. Eine ganze Generation von Kindern und Jugendlichen hat sich daran versucht neue Welten zu erobern und zu besiedeln. Durch ihre Tiefe hatten diese Spiele

durchaus auch einen positiven Lerneffekt. Die ansprechende Grafik und die musikalische Untermalung hat den Spieler wahrlich in andere Welten entführt und ein bleibendes Erlebnisgefühl vermittelt.



Eines der erfolgreichsten Spiele dieses Spielsegmentes war 'SimCity'. Die einprägende schematische Grafik, welche noch aus den späten 80-er Jahren entstammte und entgegen dem späteren Spiel Anno 1602 eher technisch wirkte, lenkte den Fokus mehr auf die eigentlichen

Ereignisse auf dem Spielfeld. Es war weniger eine künstliche Welt in die der Spieler eintauchte, sondern wirkte mehr wie ein Brettspiel, das der Benutzer vor sich auf dem Tisch hatte.



Nach meiner Einschätzung eines der besten und anspruchsvollsten Computerspiele war 'Myst'. Für die Zeit in der es entwickelt und für die damaligen Zielcomputer auf denen es gespielt wurde, hatte es eine äusserst hohe Realitätsnähe was die Grafik anbetraf. In keinem Spiel zuvor wurde so viel Detail-Reichtum an künstlichen fotorealistischen Artefakten eingebaut. In keinem anderen Spiel wurde ein derart aufwendiger literarischer Hintergrund mitgegeben. Die gesamte Geräuschkulisse ist Teil des Spiels. Gelungene musikalische Kompositionen verstärken das Erlebnis wie in einem guten Film. Das alles verpackt mit einer völlig neuen Art von Spielverlauf, welcher auch geistig etwas abforderte. Ein Meisterwerk des Spiele Designs.

Kinematik als Kunst simulieren

Der Künstler Theo Jansen aus den Niederlanden beschäftigt sich mit der kinetischen Kunst. Die sog. 'strandbeest', wie er seine Mechanismen nennt, sind autonome Bewegungsapparate die sich selbständig, allein vom Wind angetrieben, über den Strand bewegen.



FIGURE 24. "strandbeest" von Theo Jansen

Die anmutige Schönheit dieser lebendig wirkenden Bewegungen kann kaum beschrieben werden. Man muss diese faszinierenden Apparate in Aktion sehen.

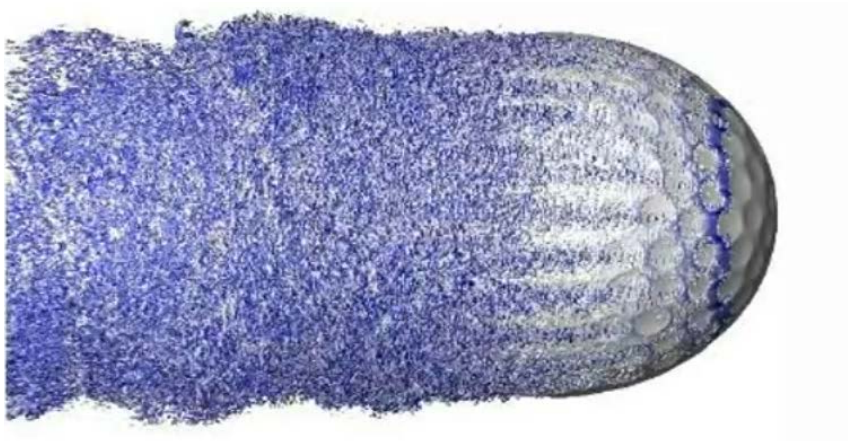
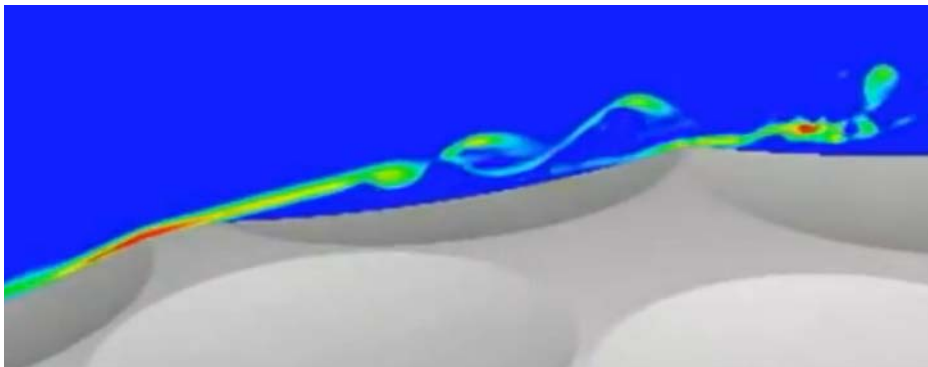
https://www.youtube.com/watch?v=LewVEF2B_pM

Theo Jansen hat es fertig gebracht, technische Kinematik als wunderschöne Simulationsmodelle in Kunst verpackt zur Anschauung zu bringen und auf diesem Weg die Schönheit der Technik im Allgemeinen und von technischen Bewegungen im Speziellen auf sehenswerte Art vorzuführen.

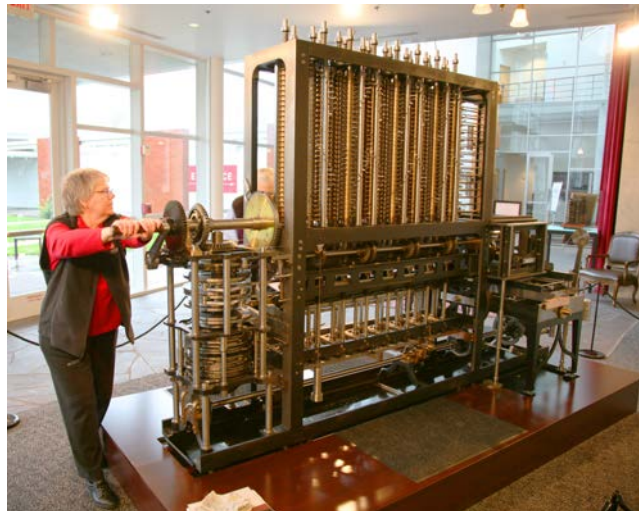
Der simulierte Golfball

Ein Golfball hat auf seiner gesamten Oberfläche kleine Dellen welche ihm sein charakteristisches Aussehen geben. Je nach Fabrikat haben diese Dellen unterschiedliche Formen wie runde oder wabenförmige Vertiefungen. Es ist nicht selbstverständlich, aber natürlich seit langer Zeit bekannt, dass diese Dellen den Luftwiderstand erheblich reduzieren. Die Dellen sorgen offenbar dafür, dass die Luftströmung früher von einer laminaren in eine turbulenten Strömung umschlägt und damit ein frühes Abreißen der Strömung verhindert. Wie das aber ganz genau und im Detail geschieht war bis heute nicht bekannt. Die Golfbälle wurden bislang einfach empirisch oder im Windkanal optimiert.

Ein Doktorand mit dem Namen Clinton E. Smith hat 2011 an der 'State University of Arizona' eine Doktorarbeit vorgelegt, in der er zusammen mit der 'University of Maryland' und mit Hilfe eines Supercomputers die Strömung um einen Golfball in einer neuen Qualität von Auflösung simulierte und analysierte. Diese Problemstellung ist in der Ärodynamik durchaus von allgemeinem Interesse und die Ergebnisse können mitunter auf andere Anwendungsgebiete in der Luftfahrt übertragen werden. In diesem Sinne ist der Golfball so etwas wie ein günstiger und massenhaft vorhandener Versuchsträger für die Untersuchung von Oberflächenstrukturen zur Verminderung und Optimierung des Luftwiderstands. Aber auch die Hersteller von Golfbällen sind nun interessiert ihre Produkte auf diesem Weg weiter zu optimieren und gegenüber der Konkurrenz die Nase etwas vorne zu haben. Die Vorzüge ihrer Produkte können sie auf diesem Weg auch Marketing-mässig gut verkaufen (Der Golfball der aus dem Supercomputer kam...)



Mechanische Analogcomputer



Nachdem es eine lange Tradition in mechanischen Rechenmaschinen gab, hatte Charles Babbage im 19. Jahrhundert die Vision eine analytische Maschine zu bauen, welche in der Lage sein sollte, beliebige mathematische Gleichungen numerisch zu lösen. Allerdings wurden seine detaillierten Pläne erst im 20. Jahrhundert vom Science Museum in London als Replikat

vollständig gebaut und in eine vollumfänglich funktionierende Maschine umgesetzt. Eine Genugtuung die er selbst nicht mehr erlebte.

Bevor nach dem zweiten Weltkrieg das eigentliche elektronische Zeitalter anbrach, wurden an verschiedenen Universitäten und Forschungslabors sogenannte analoge Rechner auf mechanischer Basis gebaut und eingesetzt. Bekanntheit erlangte der Amerikaner Vanevar Bush (1890 - 1974) (siehe Abb. unten) welcher nicht nur auf diesem Gebiet Grosses leistete, sondern der 1945 in einem Aufsatz mit dem Titel: "As we may think" auch eine Art Apparatur mit dem Namen 'Memex' vorschlug, auf welcher man auf das gesamte Wissen dieser Welt zugreifen und dieses auch darstellen konnte. Er nahm damit das Internet vorweg.



Ein Analog Computer der dargestellten Art funktioniert durch das Übersetzen von Drehungen in entsprechend andere, funktionell abhängige Drehungen. So kann man z.B. eine vorgegebene Drehung in eine solche transformieren, welche dem Sinus der eingegebenen Drehung entspricht, usw. Durch das Addieren vieler solcher mechanischer Grundeinheiten können am Ende relativ

komplizierte Gleichungssysteme mechanisch gelöst werden. Im Übrigen auch noch relativ schnell. Das ganze konnte dazu eingesetzt werden einfachere Simulationsaufgaben zu lösen. Die Genauigkeit war wahrscheinlich das grösste Problem.

MH370 - das verschollene Flugzeug

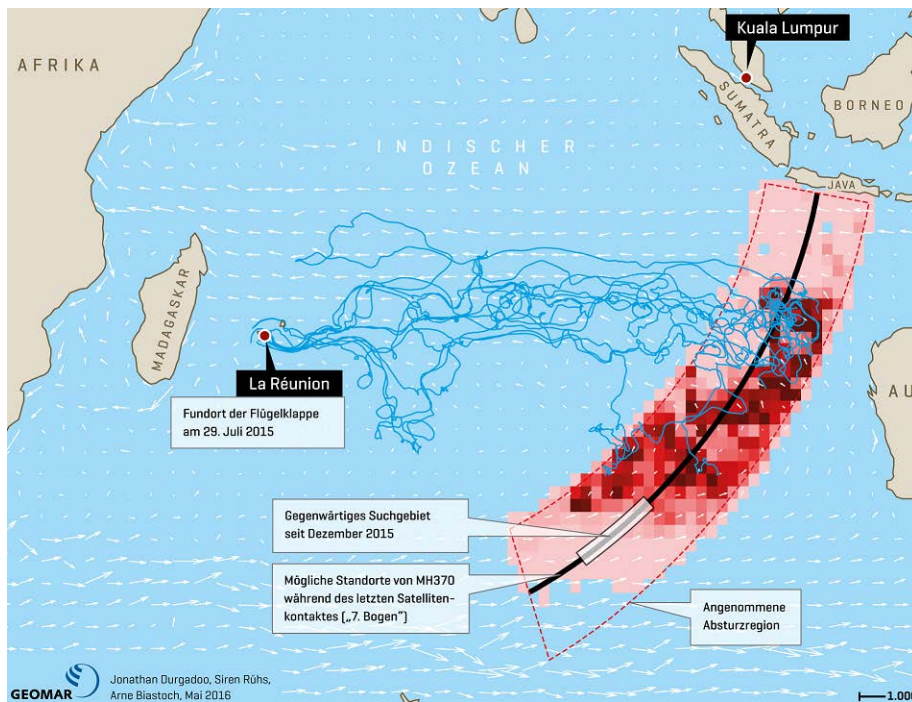
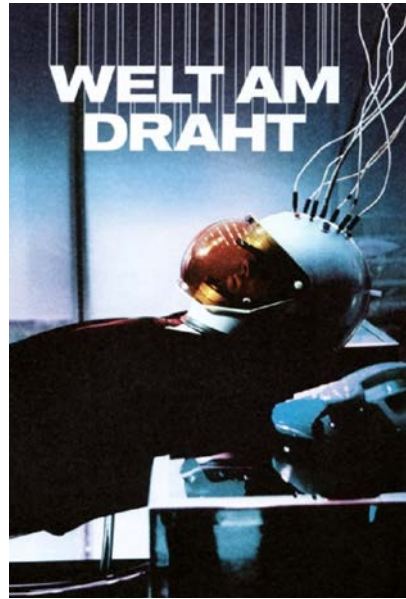


FIGURE 25. Mögliche Absturzstelle der Malaysia Airline MH370 auf Grund einer gefundenen Flügelklappe auf La Reunion. Quelle: Geomar, Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung, Kiel, Deutschland.

Mit genauen Kenntnissen der Meeresströmungen im indischen Ozean hat das Institut Geomar in Kiel mit sog. Monte Carlo Simulationen mögliche Wege einer gefundenen Flügelklappe simuliert. Das fragliche Wrackteil wurde auf der Insel La Reunion entdeckt und konnte dem verschollenen Flugzeug eindeutig zugeordnet werden. Durch eine Rückverfolgung der Meeresdrift als Funktion der Zeit wurde eine grosse Anzahl von Szenarien durchgespielt, mit dem Ziel, den Herkunftsort des Fundstückes zu evaluieren. Insbesondere stellte man sich die Frage, welche Strömungswege letztlich das vermutete Absturzgebiet längs dem in der Abbildung eingezeichneten schwarzen Bogen treffen. Dieser zeigt die mögliche Position des Flugzeuges beim letzten empfangenen Satellitenkontakt. Wie ersichtlich liegt das konkrete Suchgebiet auf dem Bogen, in welchem mehr als ein Jahr systematisch gesucht wurde, unterhalb der mit dieser Analyse gefundenen Positionen des Unglückortes.

In einer Monte Carlo Simulation wird eine grosse Anzahl von numerischen Simulationen mit leicht unterschiedlichen Anfangsbedingungen durchgespielt. Dabei wird das zeitabhängige Strömungsmodell des Ozeans und die Ankunftszeit des Fundstückes am Zielort in einer gewissen Bandbreite, welche die Unsicherheit der Daten repräsentiert, variiert. Am Ende erhält man auf diese Weise eine Wahrscheinlichkeitsaussage darüber wo das Fundstück startete. Die Abbildung zeigt ein paar typische Wege die das Wrackteil während einzelnen Simulationen genommen hat. Insgesamt wurden ca. 5 Millionen Simulationen durchgespielt. Dunkelrote Felder in der Karte sind demzufolge mögliche Absturzpositionen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit.

Ist das ganze Universum 'nur' eine Simulation?



Im Jahr 1973 verfilmte der deutsche Regisseur Rainer Werner Fassbinder den Science Fiction Roman Simulacron-3 des Autors Daniel .F. Galouye aus dem Jahr 1964 und gab dem Film den Namen 'Welt am Draht'. Ein Computerspezialist der sich mit Simulationen künstlicher Welten befasste, entdeckte, dass er und die ganze Welt um ihn herum auch nur eine Illusion war. Er selbst und unsere Welt war eine Simulation einer noch höheren Welt, so wie die Welt die er selbst auf dem Computer geschaffen hatte. Der Film 'Matrix' hat sich Jahrzehnte später dieses Themas wieder angenommen.

Im Jahre 2012 erschienen in Fachzeitschriften ernstzunehmende wissenschaftliche Artikel, welche sich dieser Fragestellung annahmen. Die Physiker Silas R. Beane, Zohreh Davoudi und Martin J. Savage verfassten ein Paper mit

dem Titel 'Constraints on the Universe as a Numerical Simulation'. Sie stellten darin Überlegungen an, wie und an was man erkennen könnte, ob unser Universum eine Simulation ist. Nick Bostrom, ein Oxford Philosophie Professor hat diese Diskussion bereits im Jahre 2003 angeregt und weltweit einen lebendigen Meinungsaustausch in Gang gesetzt.

Auch wenn wir an dieser Stelle den Leser enttäuschen müssen, eine abschliessende Antwort auf die Frage ist bis heute nicht gemacht worden. Es sind aber im oben erwähnten wissenschaftlichen Artikel Kriterien zur Erkennung eines solchen Sachverhaltes vorgeschlagen worden. Allerdings würden die entsprechenden physikalischen Experimente einiges an Geld und Aufwand verschlingen um sie durchzuführen. Die Verfasser des Artikels kommen, vereinfacht formuliert, zum Schluss, dass auch unser Universum letztlich eine Gitterstruktur (n-ter Dimension) haben müsste und dass auch in dieser Gitterstruktur die Transportgleichungen von gewissen physikalischen Vorgängen astronomischen Ausmasses nicht isotrop sein könnten. Und dieses anisotrope Verhalten dieser Vorgänge könnte darauf hinweisen, dass wir in einer Simulation leben. Die Tatsache, dass sich in der Teilchenphysik alle elementaren Vorgänge letztlich auf kleinste Austauschteilchen zurückführen lassen, könnte ein weiterer Hinweis darauf sein, dass jemand mit uns 'rechnet'.

Bereits heute simulieren wir in beschränktem Umfang Teile dieser Welt auf dem Computer. Irgendwann in der Zukunft werden wir in der Lage sein, diese simulierten Welten mit künstlichen Avataren zu bevölkern, welche Kraft der Komplexität ihres eigenen Software-Gehirns Bewusstsein entwickeln könnten. Wir können dafür sorgen, dass diese Wesen mit ihren Sensoren in ihrer Umwelt rein Software-mässig all das wahrnehmen, was auch wir mit unseren fünf Sinnen in unserer Welt erleben. Und das alles ohne materielle 'Wirklichkeit' in einem Computer. In was unterscheiden sich diese virtuellen Wesen dann in letzter Konsequenz noch von uns? Werden sie irgendwann merken, dass es noch eine höhere Welt gibt?

