

# 14.

## Modellierung und Simulation

---

Buch Mark Weiss „Data Structures & Problem Solving Using Java“ siehe:  
- Kap. 13.2, S. 513-522 (ereignisgesteuerte Simulation)

# Lernziele Kapitel 14 Modellierung und Simulation

- Zweck und typische Anwendungsgebiete von Simulation kennen
- Die Rolle von Modellbildung und Abstraktion verstehen
- Das Prinzip der zeitgesteuerten und das Prinzip der ereignisgesteuerten Simulation kennen
- Die beiden Simulationsparadigmen vergleichend bewerten können

## Thema / Inhalt

Im Lexikon wird „**Simulation**“ so definiert: „Darstellung oder Nachbildung physikalischer, technischer, biologischer, psychologischer oder ökonomischer Prozesse durch mathematische oder physikalische Modelle, die eine wirklichkeitsnahe, jedoch einfachere, billigere oder ungefährlichere Untersuchung als das Objekt erlauben.“ Das ist eine gute Erläuterung, weil nicht nur gesagt wird, was es ist (Nachbildung), sondern auch wie (durch mathematische Modelle) und wieso (einfacher etc.) simuliert wird. Für unsere Zwecke ist aber noch zu ergänzen, dass wir Simulation mit Computerhilfe betreiben, konkret: dass das Modell als Abbild der Wirklichkeit ein Stück Software ist, das ausgeführt werden kann. Dann lässt sich Simulation kurzgefasst auch als „**Experiment mit einem digitalen Modell**“ charakterisieren.

# Thema / Inhalt (2)

Ein **Modell** ist in diesem Sinne ein vereinfachtes Abbild der komplexen Realität, das allerdings nicht allzu einfach sein darf: Es muss sich bezüglich der relevanten Aspekte natürlich analog zur Realität verhalten. Die Kunst des Modellierens besteht daher darin, möglichst gut zu abstrahieren: Das Unwesentliche weglassen, aber das (für den intendierten Zweck) Wesentliche beibehalten.

Indem man ein Experiment mit einem Modell durchführt, gewinnt man **Erkenntnisse über den modellierten Weltausschnitt**; aus diesem Grund simuliert man ja schliesslich. Daraus ergibt sich, dass Simulation sehr vielseitigen Zwecken dienen kann: Auswahl von Entwurfsalternativen (also als Entscheidungshilfe), Optimierung von Systemen oder Prozessen, Prognose zum Verhalten eines Systems und vieles mehr. Simulation wird vor allem dann eingesetzt, wenn ein Experiment mit dem echten System, also in der „Wirklichkeit“, nicht möglich oder nicht angezeigt ist. Etwa weil es in der Realität zu schnell gehen würde (chemische Reaktionen) oder aber zu langsam (Entstehung von Galaxien), weil die Realität das Experiment nicht ertragen würde (Atomkrieg, Klimakatastrophe), weil das reale System erst noch gebaut werden muss, oder weil ein reales Experiment schlicht zu teuer wäre. Daher findet computerbasierte Simulation breite Anwendung in der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung, der Ökologie und Biologie, der Verkehrsplanung, der industriellen Fertigung und Logistik sowie natürlich beim Militär. Zur Anwendung in der Meteorologie und Klimaforschung kommen wir noch weiter unten.

Die Verwendung von Modellen ist mindestens so alt wie die Technik selbst – schon in der Antike konstruierte man etwa Holzmodelle von geplanten Bauwerken. In einem umfassenderen Sinne begleitet die Modellbildung sogar die gesamte kulturelle Entwicklung der Menschheit: Indem man sich ein Modell der Wirklichkeit macht, interpretiert man die Welt und versucht so,

# Thema / Inhalt (3)

seine Umgebung zu begreifen. Selbst prähistorische Höhlenzeichnungen als früheste Zeugnisse menschlicher Kultur wurden gelegentlich als Darstellung solcher Modelle interpretiert, und auch im phantasievollen Spiel von Kindern – eine Schere wird zum Krokodil, ein Holzklötzchen zum Auto – zeigt sich die angeborene Verhaltensweise des Menschen, durch Modellbildung und Simulation anschauliche Vorstellungen, Fertigkeiten und Kenntnisse über reale oder imaginäre Sachverhalte zu erlangen. Die Fähigkeit, **mentale** oder **physische Modelle** zu bilden, stellt jedenfalls eine wesentliche Voraussetzung für **rationale Entscheidungsfindung** und damit für planvolles Handeln dar.

Von den physischen und mentalen Modellen zu unterscheiden sind **symbolische Modelle**, bei denen die realen Objekte sowie deren Verhaltensweisen und Beziehungen untereinander durch abstrakte Begriffe beschrieben werden. Diese sind klassischerweise die Domäne der Mathematik, aber auch der modernen Physik und der Informatik. Hierbei lassen sich zwei Modellklassen unterscheiden: Einerseits die analytischen Modelle, bei denen ein dynamisches Systemverhalten typischerweise durch eine Menge gekoppelter (Differential-) Gleichungen charakterisiert ist, sowie andererseits die deskriptiven Modelle, bei denen das reale System durch einzelne zustandsbehaftete Simulationskomponenten, die aufeinander einwirken, beschrieben wird.

**Analytische Modelle** basieren in der Regel auf einer fundierten wissenschaftlichen Theorie, die das Verhalten des realen Systems erklärt – vielfältige Beispiele dazu findet man etwa in der Physik und Chemie. Eine Simulation reduziert sich dabei i.Allg. auf das (mathematisch allerdings meist nicht-triviale) „Ausrechnen“ und ist insofern eine deduktive Vorgehensweise.

Diese Methode war in der Vergangenheit vor allem in den angewandten Naturwissenschaften und Ingenieurwissenschaften sehr erfolgreich; nachteilig ist jedoch, dass bei der Modellbildung



# Thema / Inhalt (4)

meist stark vereinfacht und idealisiert werden muss, um überhaupt eine analytische Beschreibung oder Lösung zu ermöglichen. Zudem stellen viele der heute interessierenden Vorgänge in Natur, Umwelt und Technik Systeme aus unstetigen oder nichtlinearen Prozessen dar, die in komplexer Weise miteinander vernetzt und rückgekoppelt sind und für die keine geschlossene Theorie oder adäquate Beschreibung in analytischer Form vorliegt.

In solchen Fällen sind **deskriptive Modelle** sinnvoll, bei denen mehr oder weniger explizit eine künstliche Welt im Rechner nachgebaut wird und sich Erkenntnisse in induktiver Weise durch Experimente an diesem Modell erschliessen. Deskriptiven Modellen sind ihrem Wesen nach diskret; die oftmals hohe Komplexität solcher Modelle stellt dabei bezüglich den Genauigkeitsforderungen und der gewünschten Ausführungsgeschwindigkeit eine Herausforderung dar.

Dass Simulationen trotz des Einsatzes der jeweils modernsten Supercomputer oft als zeitkritisch angesehen werden, liegt nicht nur an der laufend zunehmenden Modellkomplexität und dem immer höheren Detaillierungsgrad, der aus Anwendungsperspektive gewünscht wird, sondern wird noch durch zwei andere Dimensionen bedingt: Zum einen möchte man oft verschiedene Modellvarianten untersuchen und variiert daher die Modellparameter von Lauf zu Lauf, zum anderen sind viele Simulationen stochastischer Natur, und zur Reduktion der Varianz und Erhöhung der Aussagekraft und Verlässlichkeit werden solche stochastischen Läufe mehrfach wiederholt, wobei Zufallsvariablen jeweils anders belegt werden.

Nach der allgemeinen Diskussion von Modellierung und Simulation beleuchten wir kurz das Anwendungsspektrum der Simulation durch einige Beispiele aus verschiedenen Bereichen. Genauer gehen wir auf die Meteorologie als einen interessanten Anwendungsbereich ein, wo aus dem gegenwärtigen Wetter und dessen Verlauf in der jüngeren Vergangenheit modellbasiert

# Thema / Inhalt (5)

der Atmosphärenzustand in der Zukunft schrittweise simuliert wird, aus dem sich dann das zukünftige Wetter ableiten lässt.

Tatsächlich ist die Meteorologie ein lehrreiches Beispiel für eine bedeutende, aber oft unterschätzte, Anwendung von Computern, die einen hohen Nutzen stiftet. Die schnellsten und teuersten Supercomputer werden heute für die Wetterprognose benutzt – dabei werden mathematisch-physikalische Modelle für die Atmosphärendynamik mit Daten vielfältiger Sensoren sowie mit Meldungen von Satelliten gespeist. Dass heute mehrtägige Prognosen recht zuverlässig sind, ist gleichermassen eine Erfolgsgeschichte der Meteorologie (adäquate physikalische Modelle), der Mathematik (effizientes Lösen partieller Differentialgleichungen unter Beachtung der numerischen Stabilität) und der Informatik (Supercomputer, Clustercomputer, Parallelrechner und deren Programmierung) über die letzten rund 100 Jahre. Und nicht zu vergessen die Infrastruktur zur Weitermeldung und Aufbereitung der vielen automatisch gewonnenen Daten.

Auch hier spielt wieder John von Neumann eine relevante Rolle; Ende der 1940er Jahre besass er das notwendige Wissen und hatte die Fäden in der Hand: Einerseits verfügte er über exzellente Kenntnisse des ersten praktisch nutzbaren elektronischen Computers ENIAC und konnte über dessen Einsatz mitbestimmen. Zum anderen war er mit den entscheidenden mathematischen Arbeiten um Richard Courant zu den Stabilitätskriterien bei der numerischen Integration partieller Differentialgleichung vertraut. Und schliesslich reizte ihn die numerische Wetterprognose als berechenbares physikalisches Problem. Er tat sich mit Meteorologen zusammen und schrieb schon im Mai 1946: „The objective of this project is an investigation of the theory of dynamic meteorology in order to make it accessible to highspeed, electronic, digital, automatic computing.“ Seine Frau Klara arbeitete bei der Programmierung des ENIAC-Computers mit; tatsächlich war sie einer der weltweit ersten Programmierer. Das Projekt war insofern ein Erfolg,

# Thema / Inhalt (6)

als es eine zutreffende Prognose berechnete; es verhalf der numerischen Wetterprognose dadurch zum Durchbruch.

Aufgrund dieses Themas sind die Anmerkungen zum historischen Kontext in diesem Kapitel relativ umfangreich; neben der Geschichte der numerischen Wetterprognose geht es dabei aber auch nochmal um menschliche Rechner und Rechnerinnen („computing is our duty“) sowie um die erste elektronische Rechanlage, die **ENIAC**: Ihren Aufbau, ihre Programmierung, ihre Programmiererinnen und ihre Anwendungen.

Der faktische Teil des Kapitels dreht sich um die beiden Hauptparadigmen der **zeitdiskreten Simulation**. Dabei wird der Modellzustand Zeitschritt für Zeitschritt fortgeschrieben, kontinuierliche Abläufe werden zeitlich diskretisiert. Die **zeitgesteuerte Simulation** stellt eines der beiden zeitdiskreten Paradigmen dar, sie zeichnet sich dadurch aus, dass die Simulationsuhr (welche die aktuelle Zeit des Modells, die sogenannte Simulationszeit, anzeigt) eine unabhängige Variable ist, die fortlaufend um ein festes Inkrement erhöht wird, was eine neue Zeitepoche einläutet. Alle Zustandsgrößen des Modells werden zyklisch für die nächste Zeitepoche entsprechend den Vorgaben des Modells aus den Werten der Zustandsgrößen der vorangehenden Epoche neu berechnet. Innerhalb einer Epoche ändert sich im Modell nichts, das (in der Realität kontinuierliche) „Geschehen“ wird auf den Zeitpunkt der Epochenumschaltung komprimiert.

Als ein Beispiel für die zeitgesteuerten Simulation betrachten wir eine Miniwelt, bei der eine Scheune mit Weizen eine Hauptrolle einnimmt, ferner Mäuse, die Weizen fressen und sich vermehren (sofern sie satt sind) sowie Katzen, die von den Mäusen leben und sich bei ausreichender Nahrung ebenfalls vermehren. Die Lebenszeit von Mäusen und Katzen ist begrenzt,

# Thema / Inhalt (7)

der Weizenvorrat ebenfalls, dieser wird nur ein Mal im Jahr bei der Ernte wieder aufgefüllt. Das Problem besteht darin, festzustellen, wie sich der Bestand an Weizen, Mäusen und Katzen über die Zeit entwickelt, ob sich evtl. ein Gleichgewicht einstellt, oder ob vielleicht eine Hungersnot bei den Katzen oder Mäusen (oder den Dorfbewohnern, die sich ja auch aus dem Vorrat in der Scheune bedienen) ausbricht oder ob alles über alle Grenzen wächst.

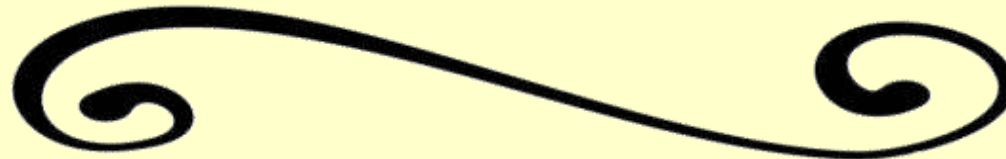
Das **Weizen-Katzen-Mäuse-Beispiel** demonstriert zwar grundsätzliche Eigenschaften der zeitgesteuerten Simulation dynamischer Systeme, ist aber ziemlich realitätsfremd, da allzu sehr vereinfacht wird. Anfang der 1970er-Jahre wurde am MIT jedoch ein ernsthafter Versuch unternommen, ein grösseres ökonomisches Weltmodell aufzustellen und damit Simulationsrechnungen durchzuführen. Das Modell umfasst fünf Hauptsektoren (Bevölkerung, Landwirtschaft, Industrie, Rohstoffe, Umwelt) mit zahlreichen gegenseitigen Abhängigkeiten. Das Ergebnis der Simulation: Nur wenn Pro-Kopf-Produktion und Bevölkerungszahl konstant bleiben und der Ressourcenverbrauch auf ein Viertel schrumpft, kann die Menschheit der Katastrophe entgehen. In allen anderen Fällen drohen im 21. Jahrhundert globale Hungersnöte und der Zusammenbruch der Industriekapazität. Das zum Projekt 1972 veröffentlichte Buch „**Die Grenzen des Wachstums**“ wurde ein Bestseller, der Buchtitel stieg zu einem geflügelten Wort auf.

Das zweite zeitdiskrete Simulationsparadigma stellt die **ereignisgesteuerte Simulation** dar. Bei diesem Simulationsprinzip wird angenommen, dass Zustandsänderungen am Modell nur durch das Eintreten von atomaren, d.h. keine Simulationszeit verbrauchenden Ereignisse verursacht werden. Alle Ereignisse besitzen einen Eintrittszeitpunkt, wobei einige bereits initial vorgemerkt sind, die meisten Ereignisse jedoch erst im Verlauf der Simulation entstehen und

# Thema / Inhalt (8)

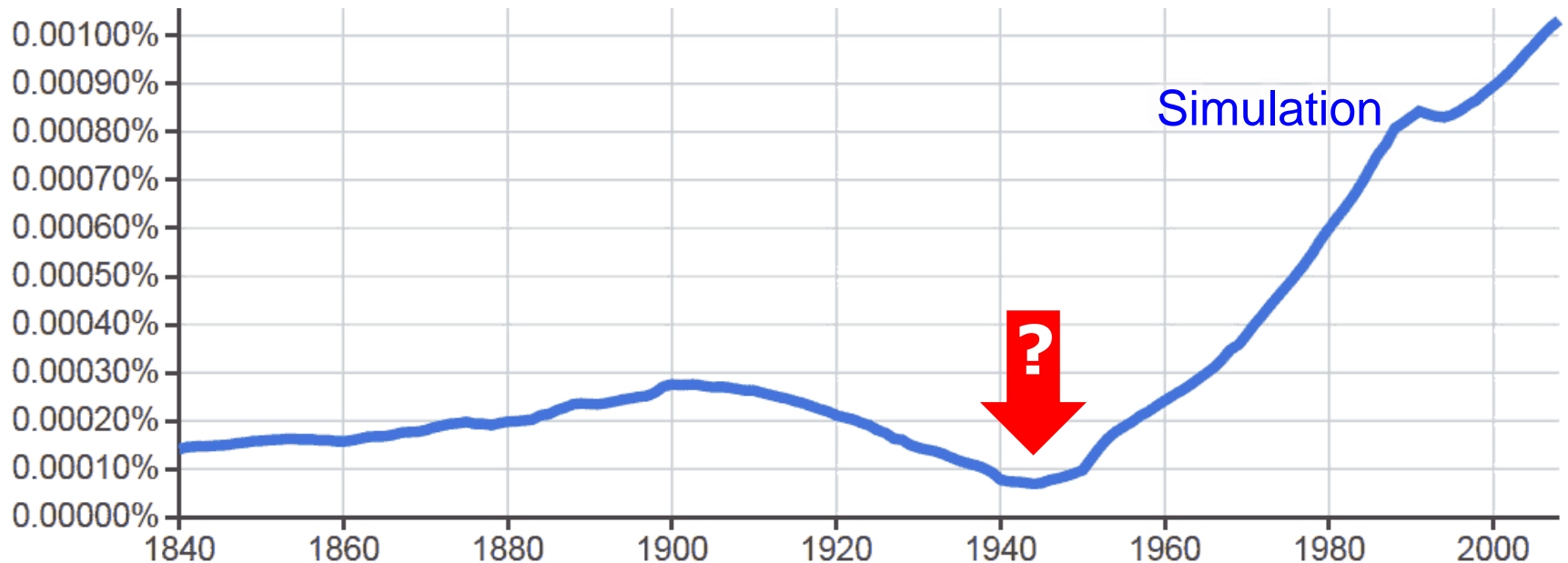
in einer Planungsliste verwaltet werden. Da entsprechend der ereignisorientierten Weltsicht zwischen zwei Ereignissen nichts geschieht, kann in iterativer Weise jeweils die Simulationszeit „schlagartig“ auf den Eintrittszeitpunkt des nächsten eingeplanten Ereignisses erhöht werden und die mit diesem Ereignis verbundene Zustandsänderung, inklusiv einer möglichen Erzeugung neuer Ereignisse, durchgeführt werden. Die ereignisgesteuerte Simulation ist gegenüber der zeitgesteuerten Simulation dann von Vorteil, wenn das Modell aus unterschiedlichen Objekten besteht, die eher sporadisch miteinander wechselwirken; lange „Totzeiten“, die man mit der zeitgesteuerten Simulation sonst durchleiden müsste, werden so automatisch übersprungen.

Bemerkenswert ist hierbei der **Dualismus beim Zeitbegriff**: Zwischen Ereignissen vergeht zwar Simulationszeit (also „echte“ Zeit in der simulierten Realität), da ein ereignisgesteuerter Simulator aber diese ereignislosen Phasen überspringt, benötigt er dafür keine Rechenzeit. Hingegen geschehen Ereignisse in Simulationszeit (und in der simulierten Realität) instantan, der Simulator benötigt zur Ausführung zugehöriger Ereignisroutinen jedoch Rechenzeit. Möchte man Simulationsabläufe beschleunigen, also mit weniger Rechenzeit auskommen, dann wird dieser Zeitdualismus hochrelevant!



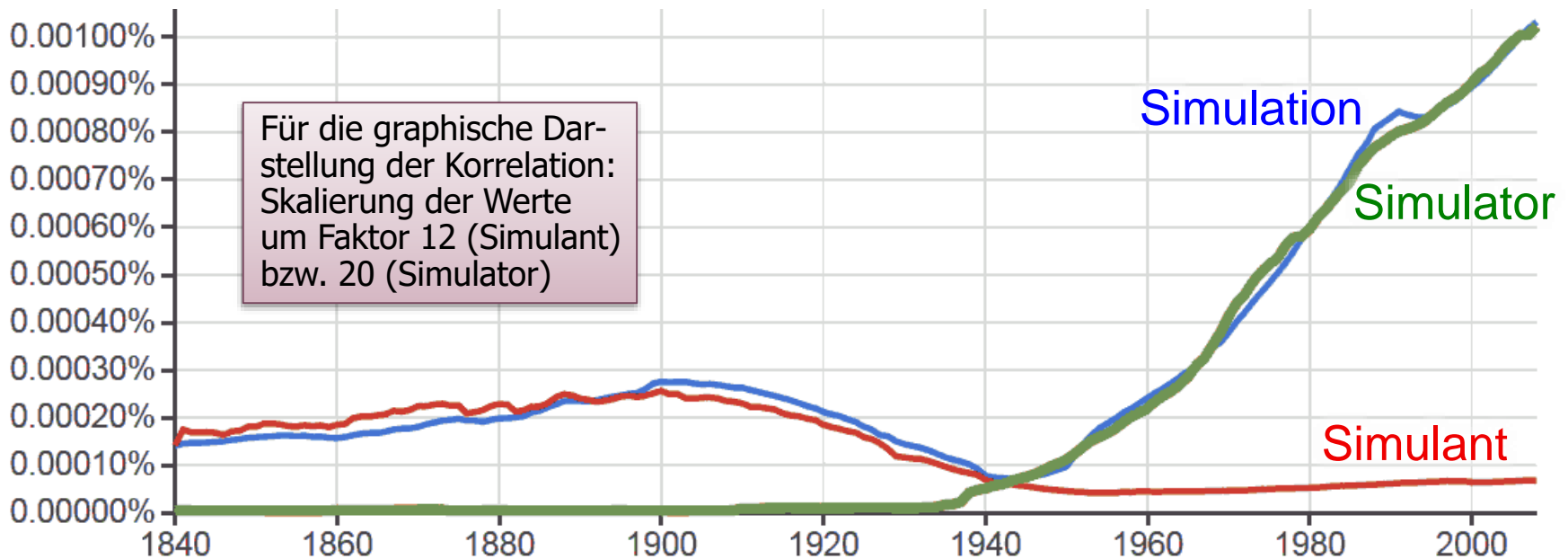
# „Simulation“ – Bedeutung des Wortes?

- Häufigkeit des Wortes „Simulation“ in der deutschen Sprache
  - Basierend auf den von Google gescannten Büchern (Erscheinungsjahr)



# „Simulation“ – Bedeutung des Wortes?

- Häufigkeit des Wortes „Simulation“ in der deutschen Sprache
  - Basierend auf den von Google gescannten Büchern (Erscheinungsjahr)



- Bis ca. 1945 korreliert „Simulation“ mit dem Begriff „Simulant“

- Danach mit „Simulator“  
→ Bedeutungsverschiebung!

Gerät / System: erzeugt künstlich realitätsnahe Verhältnisse

Ein Mensch: Heuchler; Vortäuscher einer Krankheit

# Simulare

**Stellen** (Lat. *Simulare*), heisset, wenn man sich dafür ausgiebt, was man doch nicht ist. Bisweilen geschiehet dieses, um einen guten Endzweck dadurch zu erhalten, auf eine erlaubte Art, bisweilen aber kan dergleichen Stellen zu einer sündlichen und bösen Handlung werden.

„Stellen“ im Sinne von „einen Zustand **vortäuschen**“ bzw. „sich **verstellen**“ (*sich krank stellen; er stellte sich, als ob er schlief*)

- So das „**Grosse vollständige Universal Lexicon** aller Wissenschaften und Künste, welche bißhero durch menschlichen Verstand und Witz erfunden und verbessert worden,...“ von Johann Heinrich Zedler
  - Um **1750**, ~ 284 000 Artikel auf ~ 63 000 Seiten, 68 Bände



# Meyers Konversations-Lexikon 1885 – 1892

**Simulieren** (lat.), etwas zum Schein nachahmen, erheucheln, sich verstellend vorgeben; auch s. v. w. auf oder über etwas sinnen. **Simulation**, Verstellung, Annahme des Scheins von etwas, Vorspiegelung. Häufig werden Krankheiten simuliert, um bestimmte Zwecke zu erreichen, und namentlich Epilepsie, Krämpfe, Geistesstörungen, Lähmungen, Bluthusten, Blindheit, Taubheit zc. nachgeahmt.

Dazu: **dissimilieren** (von lat. dis-similis = nicht gleich): unkenntlich machen, maskieren, verbergen; **Dissimulation**: bewusste Verheimlichung von Krankheiten oder Krankheitssymptomen. Vgl. engl. „**dissemble**“: heucheln, verbergen, verhehlen, vortäuschen; bzw. „**dissembling**“: arglistig, heuchlerisch. Vgl. weiter auch engl. „**similar**“ oder franz. „**similaire**“ von lat. similis = ähnlich, gleichartig, vergleichbar; „**assimilieren**“ sowie „**Faksimile**“ (lat. fac simile = mache ähnlich!), das dem [Tele-] Fax-Gerät seinen Namen gab, was dann zum hübschen Verb „**faxen**“ geführt hat, nachdem es im 19. Jh. bereits **faksimilieren** („ein Faksimile herstellen“) gab.

# Brockhaus-Lexikon 1895

*Simulation* (lat. „Erheuchelung“, „Vorspiegelung“) ein Verhalten, welches einen dem wirklichen Sachverhalt nicht entsprechenden Schein eines anderen Sachverhalts hervorruft, meistens in der Absicht zu täuschen. Juristisch kommt in Betracht die Simulation von Geisteskrankheiten, namentlich zur Vermeidung einer dem Simulanten drohenden strafrechtlichen Verfolgung, die Vorschützung von Gebrechen oder körperlichen Krankheiten, um vermögensrechtliche Vorteile zu erlangen, beim Militär, um sich der Dienstpflicht zu entziehen.

# „Simuliren“ im Deutschen Wörterbuch der Brüder Grimm (Band 16, 1905)

**SIMSWERK** [...]

**SIMULIREN** [...] hierzu ebenda Simulirung und Simulirer (für letzteres jetzt Simulant gebräuchlich); *wiewol er weidlich simuliren, und hinter dem Berge halten kan*, Luther Tischr. 484a (1566). In der Volkssprache hat simuliren ganz allgemein die Bedeutung von nachsinnen, sich bedenken, grübeln angenommen (daneben sinniren) [...].

**SIMULTANLIEBHABER** [...]

Die Umgangssprache entwickelte im 18. Jh. über „vortäuschen, heucheln, geheime Gedanken hegen“ die Bedeutung „nachdenken, grübeln, aussinnen“: „*Als ich noch Inspektor in Grambow war*“, *begann er, „da saß ich eines Sonntags nachmittags auf der Bank vor der Thür, rauchte meine kurze Pfeif und **simulirte** über die Wirtschaft.*“ [Heinrich Seidel: Etwas vom „Böten“; Erzählende Schriften, 1889]. [Heinrich Seidel](#) (1842 - 1906) war zugleich Ingenieur und Schriftsteller. Der berühmte Spruch „[Dem Ingenieur ist nichts zu schwer](#)“ war sein Motto und ebenso die erste Zeile seines „[Ingenieurlieds](#)“. →

# Das „Ingenieurlied“ von Heinrich Seidel

## 1871

### Dem Ingenieur ist nichts zu schwere –

Er lacht und spricht: „Wenn dieses nicht, so geht doch das!“

Er überbrückt die Flüsse und die Meere,  
Die Berge unverfroren zu durchbohren ist ihm Spass.

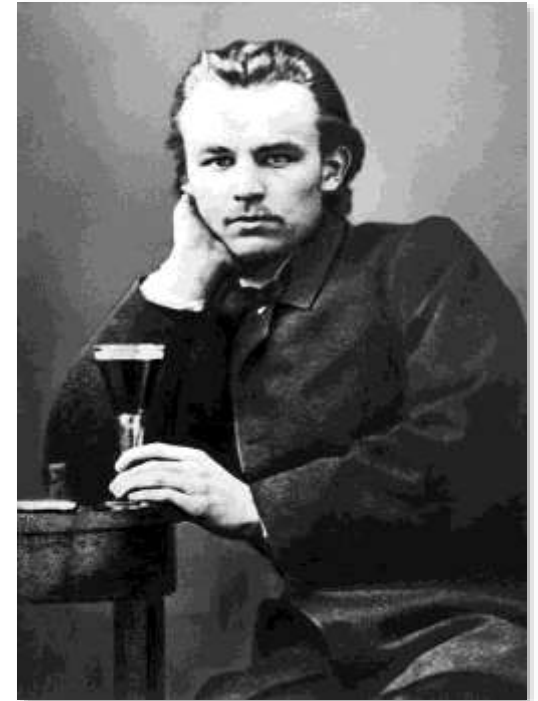
Er thürmt die Bogen in die Luft,  
Er wühlt als Maulwurf in der Gruft,  
Kein Hinderniss ist ihm zu gross –  
Er geht drauf los!

Den Riesen macht er sich zum Knechte,  
Dess' wilder Muth, durch Feuersgluth aus  
Wasserfluth befreit,  
Zum Segen wird dem menschlichen Geschlechte  
Und ruhlos schafft mit Riesenkraft am Werk  
der neuen Zeit.

Er fängt den Blitz und schickt ihn fort  
Mit schnellem Wort von Ort zu Ort,  
Von Pol zu Pol im Augenblick  
Am Eisenstrick!



„In unnachahmlicher Weise brachte der junge Maschinenbau-Ingenieur Heinrich Seidel das Selbstbild seiner Profession 1871 – am Beginn der sich formierenden »Technokratischen Hochmoderne« – auf den Punkt: Selbstbewusst bezwingt der Ingenieur die Natur, repräsen-



*Heinrich Seidel als Student*

tiert als Fortschrittsfreund den Geist der Zeit und stellt dabei sein Wirken selbstlos in den Dienst der Gemeinschaft, verbreitet Frieden und mehrt altruistisch den gesellschaftlichen Wohlstand. Durch die Mickey-Mouse-Übersetzerin Erika Fuchs, die ihrem Ingenieur Daniel Düsentrieb diese Sentenz in leicht abgewandelter Form in den Schnabel legte, ist die erste Liedzeile zum geflügelten Wort geworden.“ [Uwe Fraunholz, Sylvia Wölfel: Hochmoderne Ingenieure zwischen Altruismus und Eigensinn, 2012]

zerin Erika Fuchs, die ihrem Ingenieur Daniel Düsentrieb diese Sentenz in leicht abgewandelter Form in den Schnabel legte, ist die erste Liedzeile zum geflügelten Wort geworden.“ [Uwe Fraunholz, Sylvia Wölfel: Hochmoderne Ingenieure zwischen Altruismus und Eigensinn, 2012]

# Das „Ingenieurlied“ von Heinrich Seidel (2)

Was heut sich regt mit hunderttausend Rädern,  
In Lüften schwebt, in Grüften gräbt und  
stampft und dampft und glüht,  
Was sich bewegt mit Riemen und mit Federn,  
Und Lasten hebt, ohn' Rasten' webt und locht  
und pocht und sprüht,  
Was durch die Länder donnernd saust  
Und durch die fernen Meere braust,  
Das Alles schafft und noch viel mehr  
Der Ingenieur!

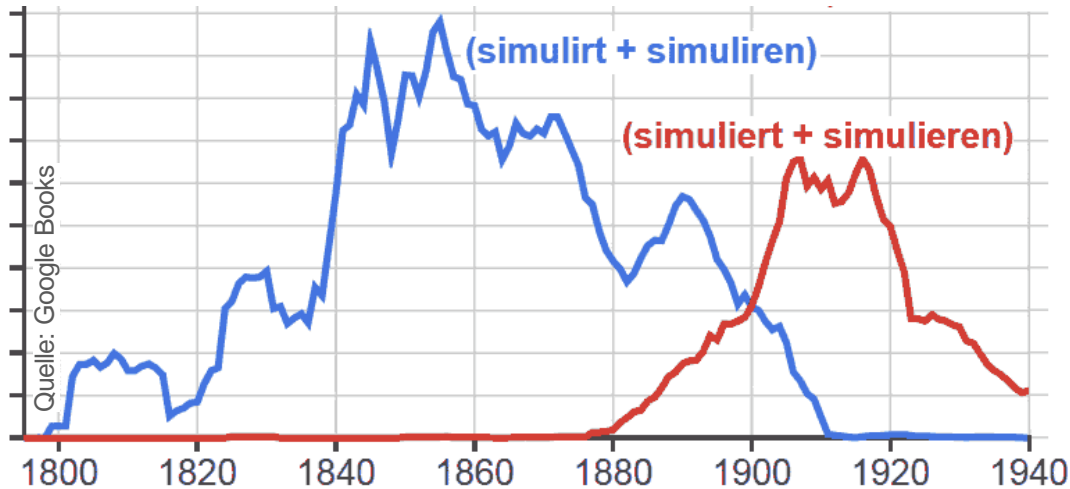
Die Ingenieure sollen leben!  
In ihnen kreist der wahre Geist der  
allerneusten Zeit!  
Dem Fortschritt ist ihr Herz ergeben,  
Dem Frieden ist hienieden ihre Kraft und  
Zeit geweiht!  
Der Arbeit Segen fort und fort,  
Ihn breitet aus von Ort zu Ort,  
Von Land zu Land, von Meer zu Meer –  
**Der Ingenieur!**



„Was für ein Examen haben Sie abgelegt, wenn die Frage erlaubt ist?“ „Ich bin Ingenieur, Herr Doktor“, antwortete Hans Castorp mit bescheidener Würde. „Ah, Ingenieur!... Das ist wacker.“  
-- Thomas Mann: „Der Zauberberg“ (1924)



# „Simul*i*ren“ vs. „simul*ie*ren“



1876 empfahl die „[Erste Orthographische Konferenz](#)“ (einberufen zur Festlegung einer einheitlichen Rechtschreibung im 1871 gegründeten Deutschen Reich) u.a., dass auf -iren/-ieren endende Verben nun alle mit „ie“ geschrieben werden sollen (also *addieren statt addiren, zitieren statt zitiren bzw. citiren*). Die Schulorthographien Bayerns und Preussens folgten diesem Vorschlag. 1880 veröffentlichte [Konrad Duden](#) auf der Grundlage dieser beiden Regelwerke sein bekanntes Wörterbuch, das innerhalb eines Jahrzehnts im gesamten deutschen Sprachraum faktische Normen schuf (1892 in der Schweiz offiziell eingeführt). In der [Rechtschreibreform von 1901](#) wurde dies bestätigt. Dieser Reform verdanken wir u.a. auch *Ereignis* statt *Ereigniss* bzw. *Ereigniß* (entsprechend *Gleichnis, Ärgernis* etc.), *gibt* statt *giebt*, *bei* statt *bey*, *Direktor* statt *Director*, *Zitrone* statt *Citrone*, *Efeu* statt *Epheu*, *Schokolade* statt *Chocolade* bzw. *Chokolade*, *Tal* statt *Thal*, *tun* statt *thun*, *Literatur* statt *Litteratur* sowie *Köln* statt *Cöln*. Ebenso reformiert wurden z.B. *Thier*, *Theil*, *Thee*, *Thür*, *roth*, *theuer*, *Wirth*, *Muth*, *Brodt* und *Todt*. Die Regierungen Deutschlands, Österreichs und der Schweiz stimmten dem „amtlichen Regelwerk“ zwar zu, aber Kaiser Wilhelm II. bestand bis 1911 darauf, dass ihm vorgelegte Schriftstücke in bisheriger Rechtschreibung abgefasst sein mussten.

Ende der historischen Notiz zum Wort „Simulation“

# Simulation – neuere Begriffsbestimmung

**Brockhaus 1983:** Darstellung oder **Nachbildung** physikalischer, technischer, biologischer, psychologischer oder ökonomischer **Prozesse** durch mathematische oder physikalische **Modelle**, die eine wirklichkeitsnahe, jedoch einfachere, billigere oder ungefährlichere **Untersuchung** als das Objekt erlauben.

was

wie

wozu

**VDI-Richtlinie 3633:** Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die **auf die Wirklichkeit übertragbar** sind.

# Simulation als Problemlösungstechnik

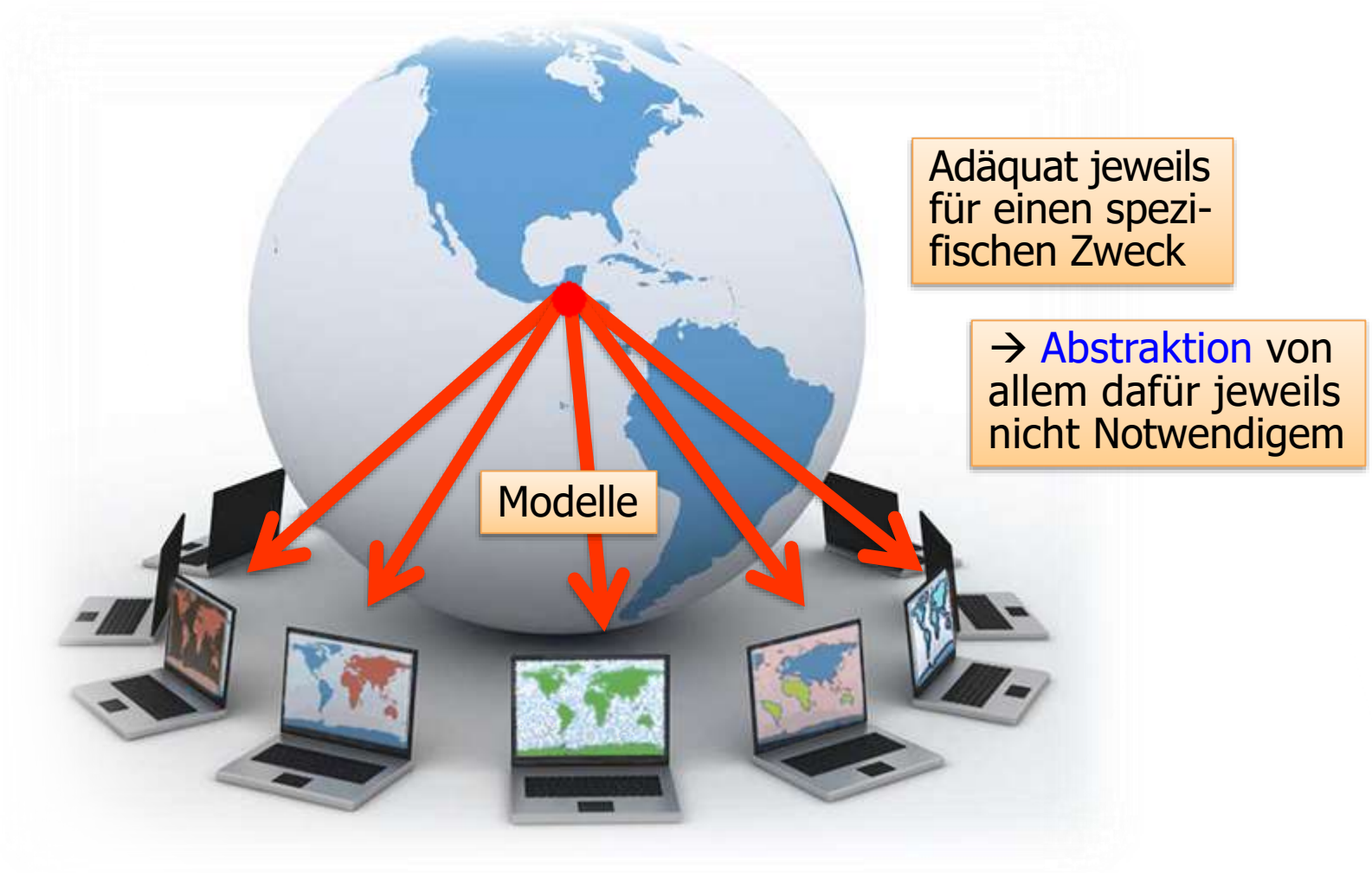
- Noch knappere Definition: **Experimente an einem Modell**
    - „Simulationsmodell“
    - Simulation ist ein „Modellexperiment“
  - Soll **Rückschlüsse auf das reale System** ermöglichen
    - Prinzip: „Wenn dies so wäre, dann würde folgendes geschehen“
  - Simulation ist also eine **Problemlösungstechnik**
  - **Warum Simulation?**
    - Für reale, komplexe Probleme / Abläufe gibt es oft keine „Lösungsformel“
- 
- Simulationen sind i.Allg. **aufwendig**
    - 1) Oft muss man einen Ablauf in vielen **verschiedenen Varianten** untersuchen
    - 2) Zur **Varianzreduktion** stochastische Simulationsläufe mehrfach wiederholen
    - 3) Hoher **Detailierungsgrad** bedingt lange Simulationsexperimente

Hier primär relevant: **programmierte Modelle**, die mit Computern ausführbar sind

Viele Supercomputer sind fast immer mit Simulationen beschäftigt

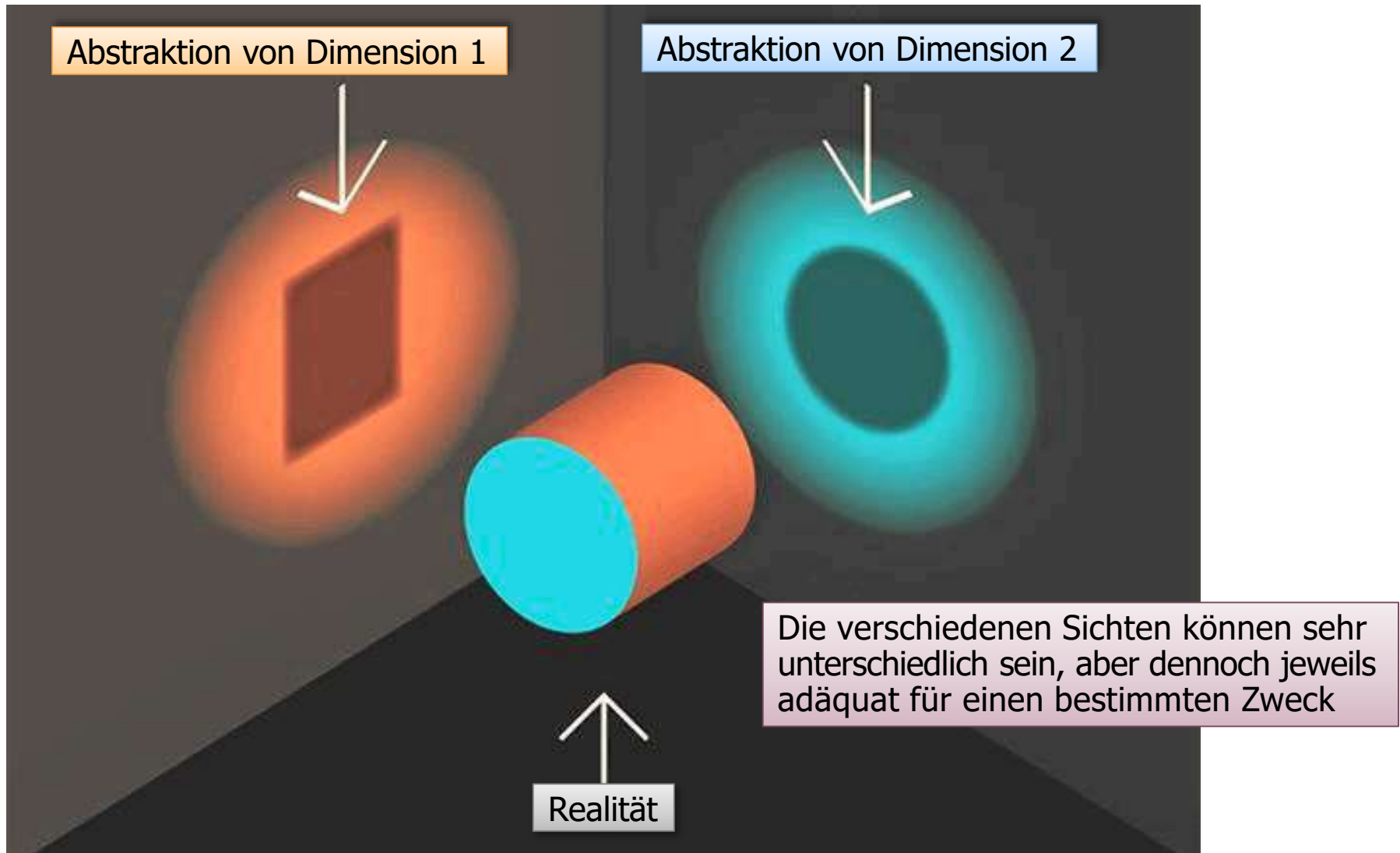


# Verschiedene Sichten („Abbilder“) der Realität



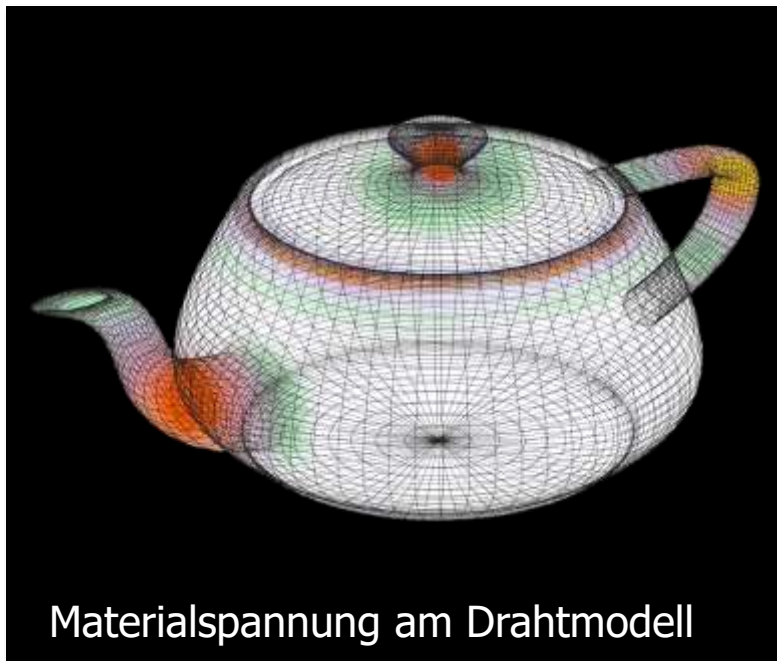
“Essentially, all models are wrong, but some are useful.” [George Edward Pelham Box]

# Ansichtssache? Frage der Perspektive? Alternative Fakten? Zylinderprojektion?

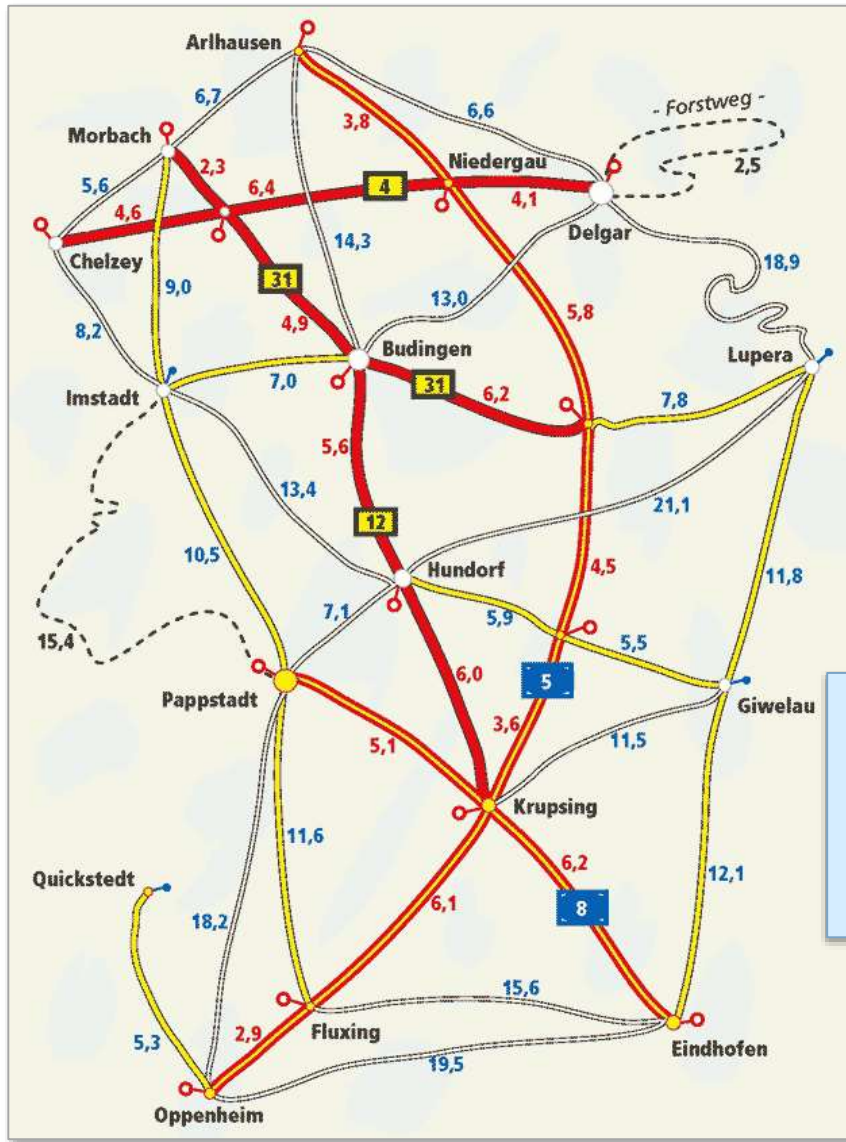


# Modellierung

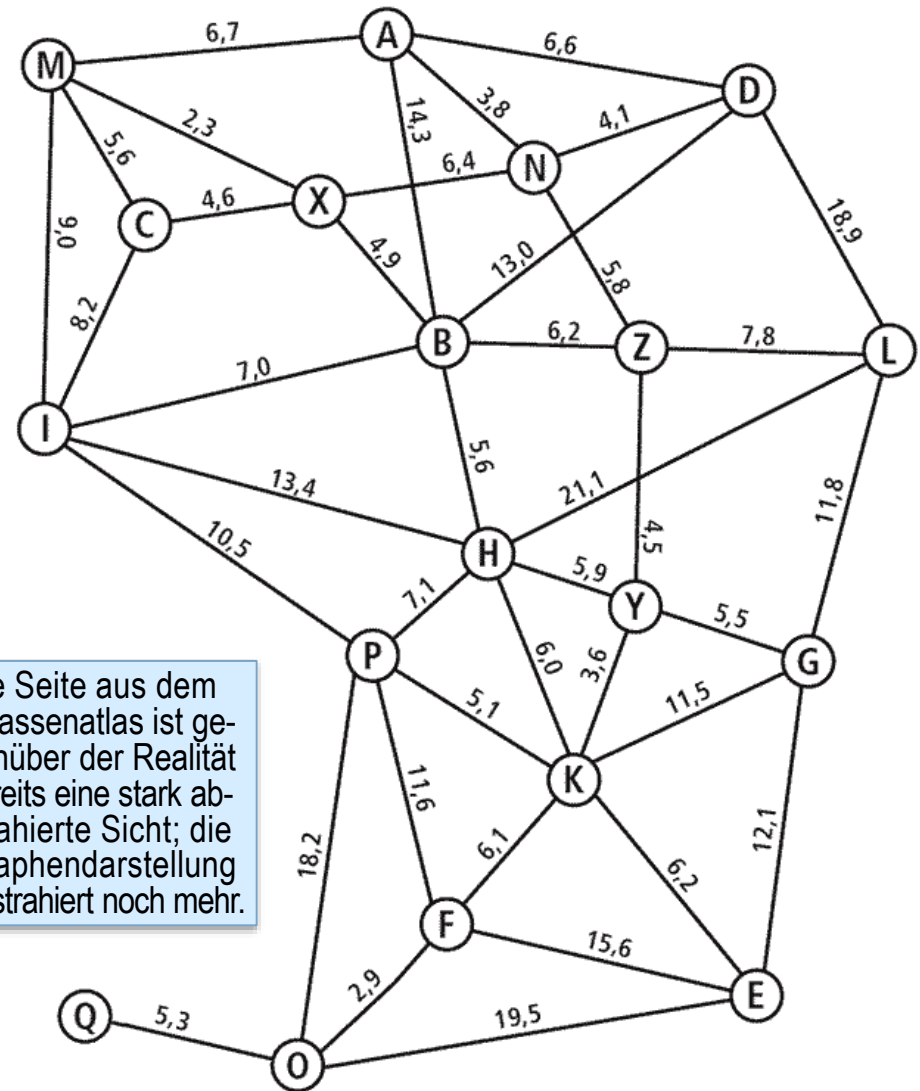
- **Verschiedene Modelle** des gleichen realen Weltausschnitts (Gegenstand, Situation,...) demonstrieren Unterschiedliches



# Modellierung – Beispiel: Strassennetz als Graph



Die Seite aus dem Strassennetz ist gegenüber der Realität bereits eine stark abstrahierte Sicht; die Graphendarstellung abstrahiert noch mehr.



Aus: Jens Gallenbacher: Abenteuer Informatik. Springer-Verlag, 2017

# Modellierung



## Verschieden detaillierte Strassennetzmodelle

- Linkes gröberes Modell z.B. zur Anzeige bei einem Navi
- Das rechte Modell mit gerichteten Kanten und mehr Knoten in den Kreuzungsbereichen modelliert auch **Einbahnstrassen** und **Abbiegemöglichkeiten** bei einer Kreuzung

(Für die Hamburgs bekannteste Einbahnstrasse, die Sierichstrasse, genügt das noch nicht – bei ihr wechselt zweimal täglich die Fahrtrichtung: von 4 bis 12 Uhr stadteinwärts, sonst auswärts)



# Modellierung

„abstrahiertes“ (lat:  
*abs-trahere*: abziehen)

- **Modell** = Vereinfachtes Abbild der komplexen Realität
  - Soll sich bzgl. relevanter Aspekte (=?) aber analog zur Realität darstellen / verhalten

sinn- / vernunftgemäss (gr.: *aná* = gemäss; *lógos* = Vernunft)

**Was ist ein Modell?** Ein Modell ist eine Abbildung der Wirklichkeit, in der man alle Aspekte, die man bezüglich seiner Fragestellung für wesentlich hält, darstellt und alles Überflüssige weglässt. Denken Sie an eine Strassenkarte. Es ist ihr Zweck, einen Weg von A nach B zu weisen. In diesem Licht ist es unerheblich, ob die Strasse durch Weizen- oder Maisfelder führt. Deshalb sind auf solchen Karten Strassen verzeichnet, aber nicht die verschiedenen Vegetationsformen.

Betrachtet man dynamische Modelle, so kommt noch die Zeit ins Spiel. Wieder beschränkt man sich auf die für die wissenschaftliche Fragestellung wesentlichen Zustandsgrößen. Gleichzeitig verlangt man, dass die zeitliche Entwicklung der Modellgrößen in einem bestimmten Phasenverhältnis zur Dynamik der wirklichen Zustandsgrößen steht, die natürlich messbar sein müssen, damit man den Wert des Modells prüfen kann. Wenn man dann die Simulationszeit des Modells mit einem Faktor multipliziert, erhält man idealerweise den Zeitverlauf der Zustandsgrößen des Realsystems. Werfen Sie einen Blick auf eine analoge Uhr, und betrachten Sie den kleinen Zeiger, der einmal von der 12 zur 12 läuft! Eine Multiplikation mit dem Faktor zwei ergibt relativ exakt die zeitliche Dauer einer Drehung der Erde um die eigene Achse. Eine klassische Armbanduhr ist eine mechanische Simulation der Erdrotation.

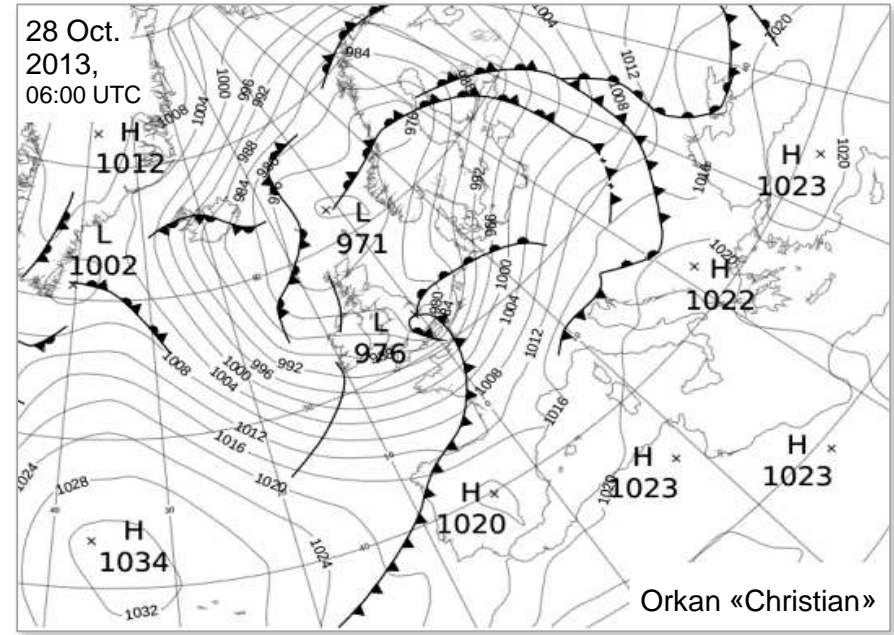
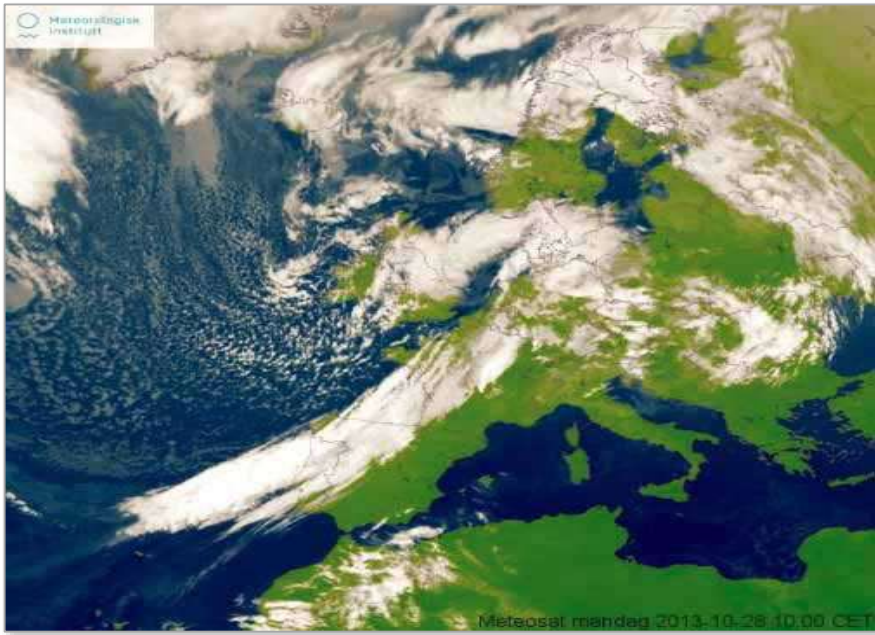
*Marco Wehr*; [www.faz.net/aktuell/wissen/hype-um-kuenstliche-intelligenz-14249506.html](http://www.faz.net/aktuell/wissen/hype-um-kuenstliche-intelligenz-14249506.html)

# Modellierung

„abstrahiertes“ (lat: *abs-trahere*: abziehen)

- **Modell** = Vereinfachtes Abbild der komplexen Realität
  - Soll sich bzgl. relevanter Aspekte (=?) aber analog zur Realität darstellen / verhalten

sinn- / vernunftgemäss (gr.: *aná* = gemäss; *lógos* = Vernunft)



„To an observer B, an object A\* is a model of an object A to the extent that B can use A\* to answer questions that interest him about A.“ – Marvin Minsky (1927–2016, einer der KI-Pioniere)



# Modellierung

„abstrahiertes“ (lat:  
*abs-trahere*: abziehen)

- **Modell** = Vereinfachtes Abbild der komplexen Realität
  - Soll sich bzgl. relevanter Aspekte (=?) aber analog zur Realität darstellen / verhalten

sinn- / vernunftgemäss (gr.: *aná* = gemäss; *lógos* = Vernunft)



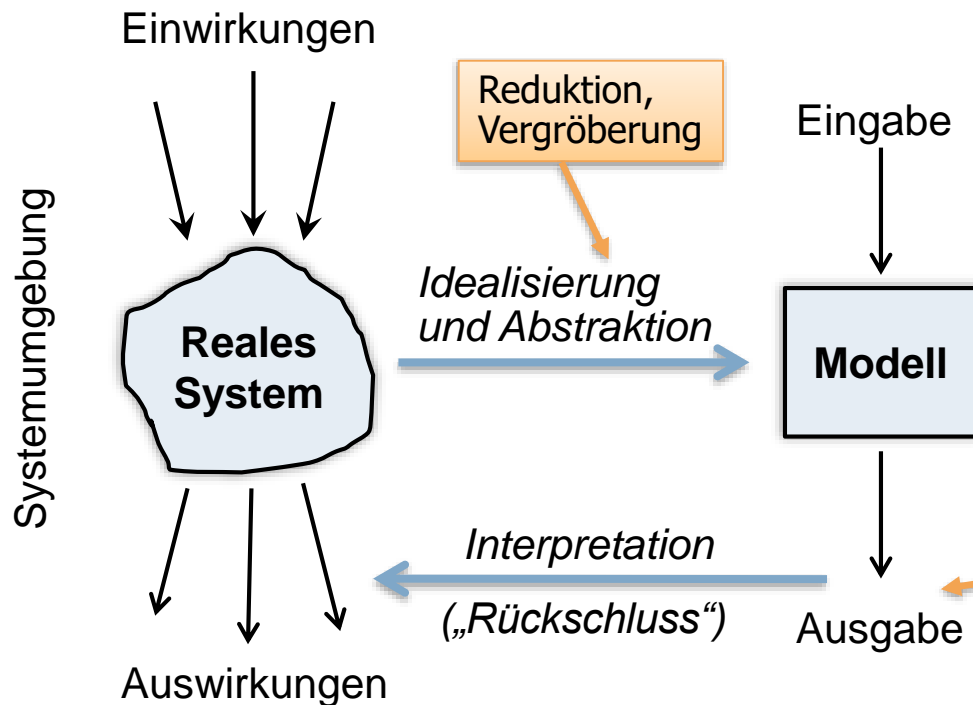
*Winkel von  $k \cdot 45^\circ$*

„Science may be described as the art of systematic over-simplification; the art of discerning what we may with advantage omit.“ – Karl Popper



# Modellierung

- **Modell** = Vereinfachtes Abbild der komplexen Realität
  - Soll sich bzgl. relevanter Aspekte (=?) aber analog zur Realität darstellen / verhalten



**Modelle** dienen u.a. dem Begreifen der Wirklichkeit als Voraussetzung für planvolles Handeln

- In diesem Sinne evtl. auch bereits prähistorische Höhlenmalereien
- Spielen von Kindern

**Heinrich Hertz** beschrieb dieses „kommutierende Diagramm“ schon 1894 in netten Worten so:

„Dass die denknotwendigen Folgen der Bilder stets wieder die Bilder seien von den naturnotwendigen Folgen der abgebildeten Gegenstände.“

**Homomorphismus:** Vom realen System per Abstraktion via Modell zum Resultat des Modellexperiments und von diesem mittels Rückschluss zurück zu den reale Auswirkungen

# Heinrich Hertz und das Konzept des mathematischen Modells



Heinrich Hertz, 1857 – 1894

Kurze Zitatauszüge aus einem Text von Claus Peter Ortlieb (Univ. Hamburg);  
ganzer Text → [www2.math.uni-hamburg.de/home/ortlieb/OrtliebHertzModell.pdf](http://www2.math.uni-hamburg.de/home/ortlieb/OrtliebHertzModell.pdf)

Die Einleitung zu Heinrich Hertz' letztem Werk „Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhange dargestellt“ ist ein Meilenstein auf dem langen Weg von Galileis Auffassung, das „Buch der Natur“ sei „in geometrischen Zeichen geschrieben“, zum modernen Konzept des mathematischen Modells. Hertz scheint der Erste gewesen zu sein, der die Bedeutung der naturwissenschaftlichen Entwicklung des 19. Jahrhunderts für die Rolle der Mathematik in der Naturerkenntnis ins Bewusstsein gehoben und die Konsequenzen deutlich ausgesprochen hat.

Als eigenständiger Begriff ist das mathematische Modell ein Kind des ausgehenden 19. und beginnenden 20. Jahrhunderts. Er ist letztlich die Voraussetzung dafür, dass sich die mathematisch-naturwissenschaftliche Methode über ihre Ursprünge in der Physik hinaus in viele andere Wissenschaften ausbreiten konnte.

Hertz kann zwar nicht als Erfinder des Modellbegriffs bezeichnet werden, weil derart fundamentale, die Wissenschaft umwälzende Begriffe nicht einfach erfunden werden – schon gar nicht von Einzelnen –, sondern aus langwierigen, oft quälenden Prozessen hervorgehen. Aber er war einer seiner, wenn nicht sogar *der* Geburtshelfer.



# DAMEN + HERREN







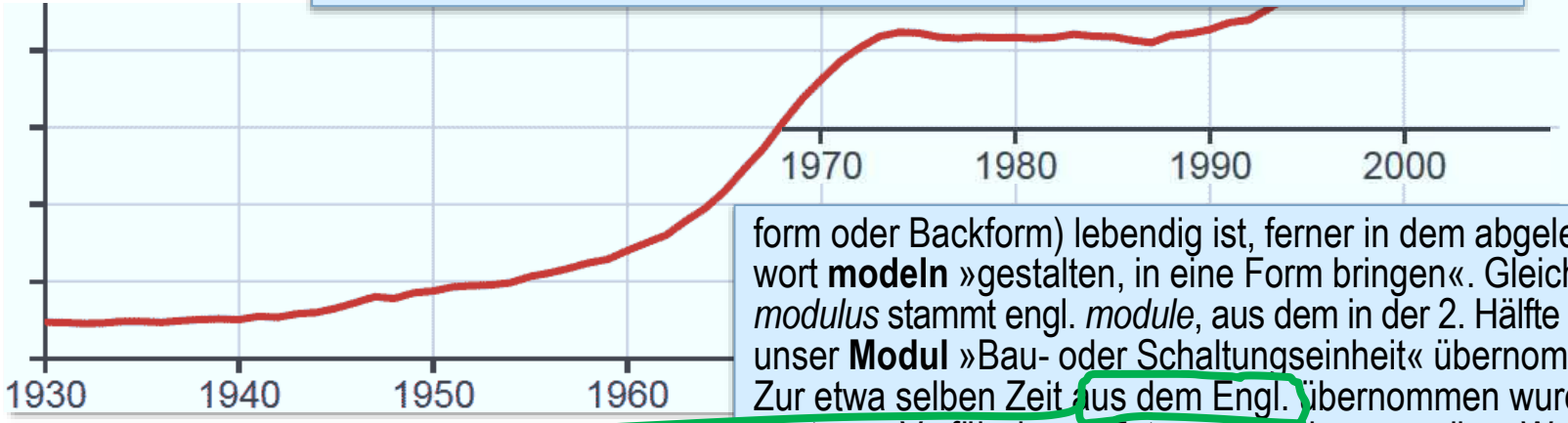
# Modell ↔ Model?



Aus lat. *modulus* (Verkleinerungsform von *modus* »Mass, Mass-Stab, Menge, Art und Weise« → daraus auch z.B. »Mode« oder »modern«) stammt **Model<sub>1</sub>** »Mass, Form, Muster«, das durch **Modell** zurückgedrängt wurde und heute nur noch in der Handwerkerfachsprache (eine Hohlform für Gusserzeugnisse, Druck-

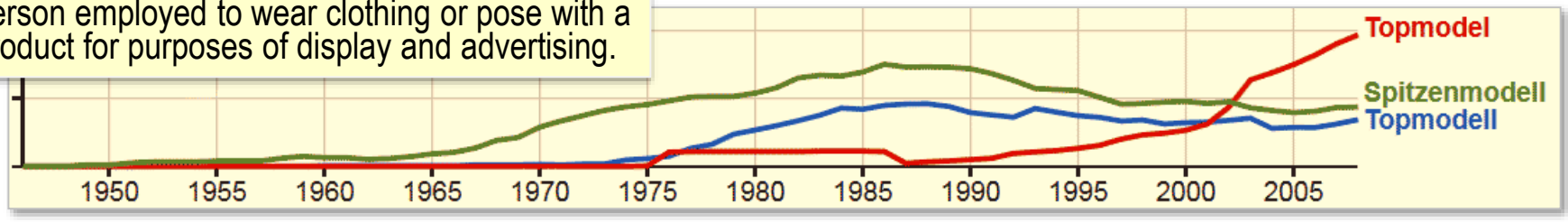
**Modell**

Quelle jew.: Google Books



form oder Backform) lebendig ist, ferner in dem abgeleiteten Zeitwort **modelln** »gestalten, in eine Form bringen«. Gleichfalls aus lat. *modulus* stammt engl. *module*, aus dem in der 2. Hälfte des 20. Jh.s unser **Modul** »Bau- oder Schaltungseinheit« übernommen wurde. Zur etwa selben Zeit **aus dem Engl.** übernommen wurde in der Bedeutung »Vorfürhdame, Fotomodell« das zur selben Wortfamilie gehörende **Model<sub>2</sub>**. In den 1970er-Jahren geriet »Modell« zunehmend in Verruf, da sich immer häufiger Callgirls als »Modelle« ausgaben.

**Model<sub>2</sub>** (1) a person serving as a subject for an artist, sculptor, writer, etc. (2) a person whose profession is posing for artists or photographers (3) a person employed to wear clothing or pose with a product for purposes of display and advertising.

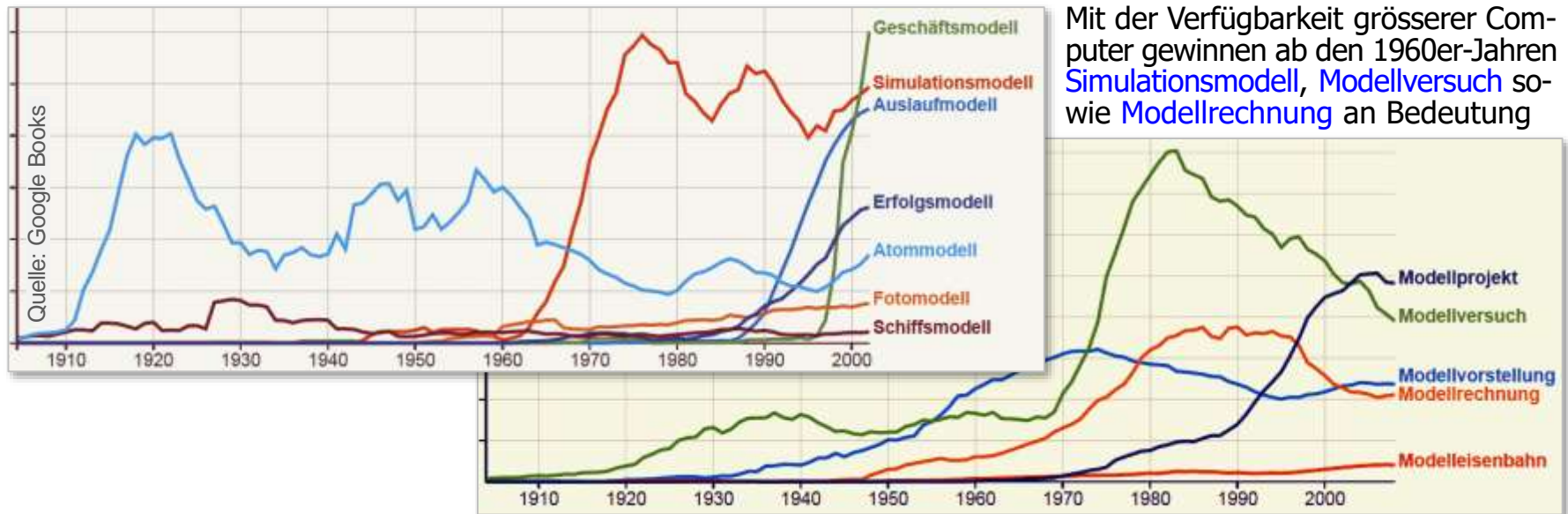


# Modell und Modellvorstellung

„Modell und Modellvorstellung gehören ohne Zweifel zu den wichtigsten menschlichen Hilfsmitteln. Vielleicht sind sie ein noch allgemeineres Unterscheidungsmerkmal zum Tier als die Sprache, die freilich selbst in die Klasse der Modelle eingereicht werden kann.

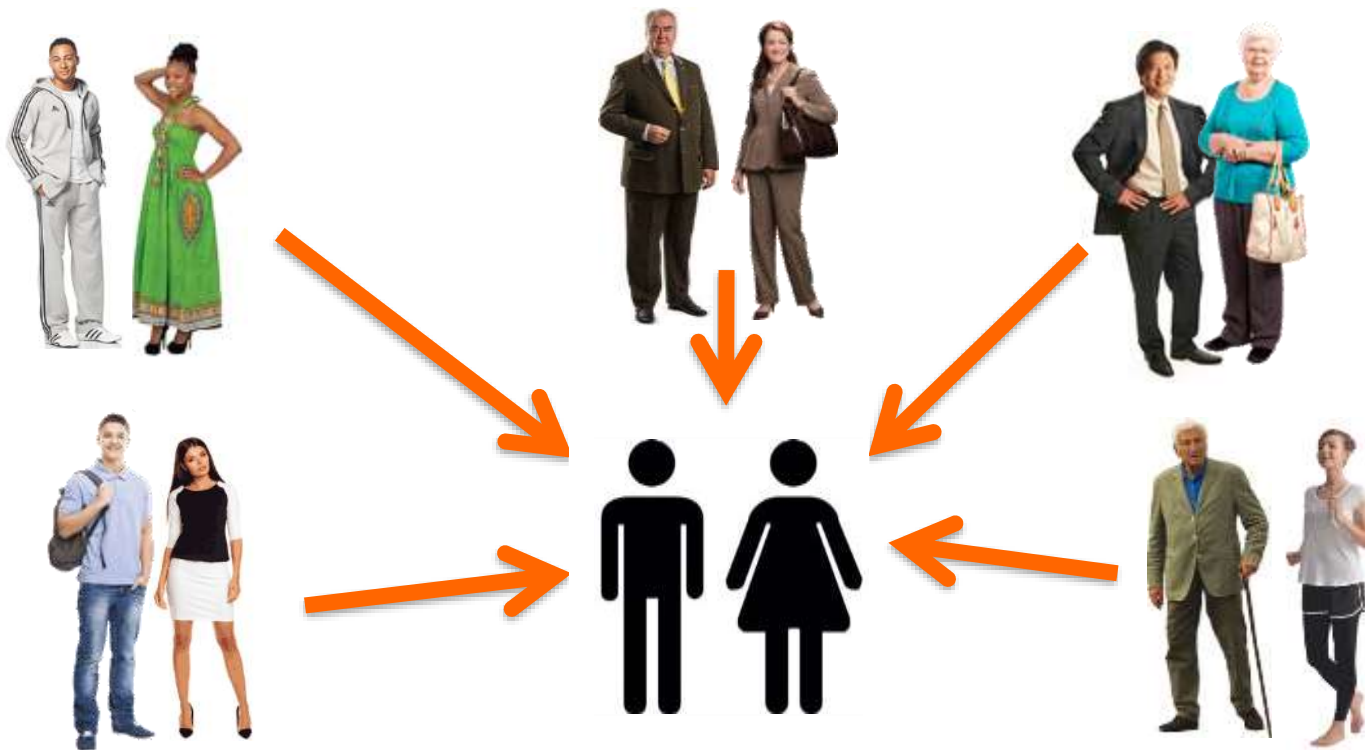
Das Modell vernachlässigt gegen die Wirklichkeit einige oder viele Dimensionen und lässt bestimmte andere dafür besonders klar hervortreten. Die Modellvorstellung lässt Vorhersagen zu, sie erlaubt das Durchspielen von Prozessen in Gedanken; man erspart sich Kosten und man vermeidet die Gefahren, die in der Wirklichkeit lauern. Und man braucht vor allem die volle Wahrheit nicht zu kennen, um beeindruckende und wertvolle Resultate zu erhalten. Ein Modell genügt seinem Zweck, wenn es sich bewährt.“

Aus: Heinz Zemanek: „Kybernetik“ (Elektronische Rechenanlagen, 1964, 6. Jg., H. 4, S. 169-177).



# Abstraktion

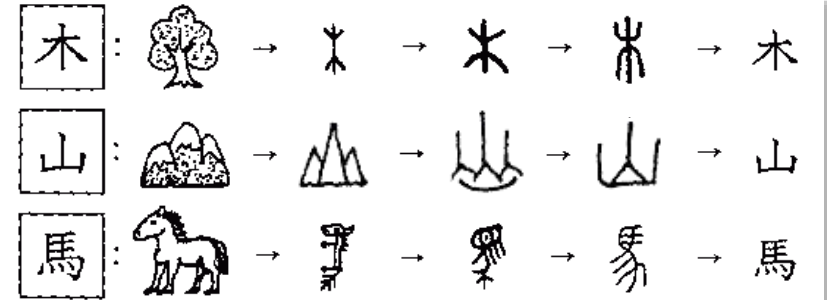
- Modellbildung und Abstraktion hängen eng zusammen
  - **Abstraktion** = „Gedankliches Verfahren, durch das von bestimmten gegebenen, jedoch als unwesentlich erachteten Merkmalen abgesehen wird, so dass sich das Augenmerk auf das Wesentliche konzentriert“



Modelle sind **reduziert**: Sie erfassen nicht alle Attribute des Originals, sondern nur diejenigen, die dem Modellierer **relevant** erscheinen.

# Zeichenbildung durch Abstraktion

- **Ikonenhafte Zeichen** für eine Klasse von Dingen entstehen oft durch **schrittweise Abstraktion**; wie hier gezeigt für Baum, Berg und Pferd im Chinesischen

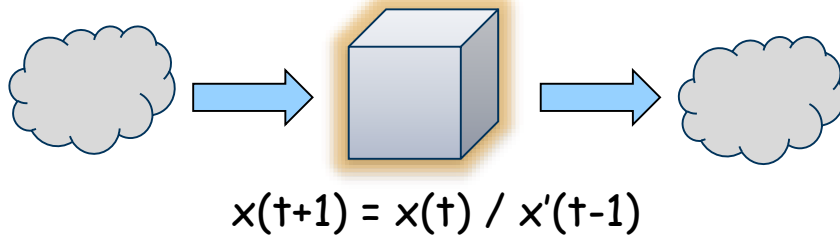


Archaische chinesische Zeichen (Piktogramme) für „Mensch“ und „Frau“

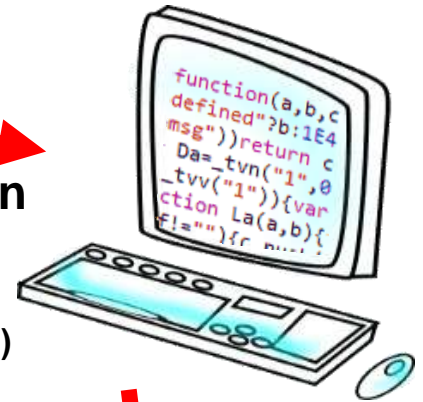
Daraus weiterentwickelt die späteren Schriftzeichen für „Mann“ und „Frau“



# Prinzip der computergestützten Simulation



**(4) Programmieren einer experimentierbaren Version**  
(„implementiertes Modell“)



**(3) Weiterentwicklung zu einem formalen (z.B. mathematischen) Modell**



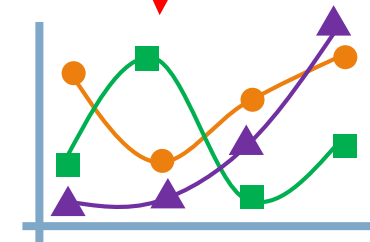
**(2) Erstellen eines konzeptionellen Modells**

**(1) Systemanalyse**



**„Simulationspipeline“:**  
Folge mehrerer Schritte, die in verschiedenen Feedback-Schleifen typischerweise mehrfach (zwecks Präzisierung & Optimierung) durchlaufen werden

**(5) Simulieren**  
(„Modellexperiment“ → Programm mit verschiedenen Parametervariationen ausführen)



**(6) Interpretieren und validieren**





# Zweck und Anwendung der Simulation

## ■ Zweck von Modellierung und Simulation

- Entscheidungshilfe (Auswahl von Entwurfsalternativen)
- Optimierung (z.B. Wirkung der Beseitigung von Engpässen)
- Prognose (z.B. Wetter)
- Validierung (z.B. Schaltplan eines neuen Mikroprozessors)
- Theorienbildung (z.B. kognitive Vorgänge)
- Animation, Erklärung („Demonstrationsmodell“)

## ■ Anwendungsgründe für Simulation

- Rein mathematische Analyse nicht möglich
- Realität erträgt Experiment nicht (Ökologie, Militär)
- Realität zu schnell (chemische Reaktionen)
- Realität zu langsam (Entstehung von Galaxien)
- Reales Experiment zu teuer
- Reales System liegt nicht vor (ist z.B. erst geplant)

Ein wesentliches **Unterscheidungsmerkmal zu analytischen Methoden** ist, dass die Simulation Prozesse (Zustandsfolgen in der Zeit) endogen aufgrund der im Modell dargestellten Wirkzusammenhänge und Zeitmechanismen entwickelt. Die Entwicklung der Zustandsfolgen in der Zeit stellt den methodischen Vorteil der Simulation im Vergleich zu mathematisch-analytischen Verfahren dar, weil auf diese Weise komplexe Sachzusammenhänge abgebildet werden können, bei denen mathematisch-analytische Methoden an ihre Grenzen stossen. [Sigrid Wenzel]

# Zweck und Anwendung

Einige Sätze zitiert aus dem Buch  
„Modellbildung und Simulation“ von  
H.-J. Bungartz et al., Springer, 2009:

Simulationen im weiteren Sinne sind in gewisser Weise also nichts anderes als "virtuelle Experimente" auf dem Computer. Daran ändert auch die Tatsache nichts, dass in den meisten Anwendungsgebieten der Simulation (beispielsweise Physik, Chemie oder Mechanik) die jeweiligen Vertreter der "rechnenden Zunft" in aller Regel den Theoretikern zugeschlagen werden. Die Attraktivität solcher virtueller Experimente liegt auf der Hand. In zahlreichen Fällen sind "echte" Experimente zum Beispiel wegen der zugrunde liegenden Zeit- und Raumskalen schlicht unmöglich. Man denke hier etwa an die Astrophysik: Kein noch so fleißiger Physiker kann Milliarden von Jahren am Teleskop verbringen, um den Lebenszyklus einer Galaxie zu studieren; oder an die Geophysik – experimentelle, also künstlich erzeugte Erdbeben mögen bei James Bond vorkommen, ein gangbarer Weg sind sie nicht. Zudem ist nicht alles, was prinzipiell möglich ist, auch erwünscht – man denke etwa an Kernwaffentests, Tierversuche oder Gentechnik.

Die Ziele, die mit einer Simulation verfolgt werden, können sehr unterschiedlich sein. Oft möchte man ein im Grunde bekanntes Szenario nachvollziehen und damit besser verstehen können. Dies gilt beispielsweise für Katastrophen technischer wie natürlicher Art. Warum ist es zu einem Erdbeben gekommen, warum gerade an diesem Ort, und warum zu diesem Zeitpunkt? Warum stürzte eine der großen Straßenbrücken über den Mississippi im US-Bundesstaat Minnesota im August 2007 ein? Wie konnte der Tsunami Ende Dezember 2004 in Südostasien eine so verheerende Wirkung entfalten? Ebenfalls erkenntnisgetrieben, aber in aller Regel noch anspruchsvoller ist das Ziel, unbekannte Szenarien vorherzusagen. Dies gilt für die genannten Katastrophen (bzw. für mögliche Wiederholungsfälle) ebenso wie für die drängenden Fragen nach dem Klimawandel oder der Entwicklung der Weltbevölkerung, aber natürlich auch für viele technische Fragestellungen (Eigenschaften neuer Legierungen oder Verbundwerkstoffe). Neben dem Ziel der Erkenntnis geht es bei Simulationen aber auch oft um Verbesserungen, also darum, ein bekanntes Szenario zu optimieren. Als prominente Beispiele hierfür seien genannt die Einsatzpläne von Airlines, der Wirkungsgrad chemischer Reaktoren, die Effizienz von Wärmetauschern oder der Datendurchsatz in einem Rechnernetz.

# Zweck und Anwendung

Typische Wortverbindungen von „simulieren“: Das Wortprofil 2012 des digitalen Wörterbuchs der deutschen Sprache ist das Ergebnis einer automatischen syntaktischen und statistischen Analyse basierend auf Korpora im Umfang von etwa 1.8 Milliarden Textwörtern.

**Wozu wird simuliert?**

in Koordination mit

analysieren  
beobachten berechnen  
demonstrieren ermöglichen  
erzeugen feststellen  
optimieren organisieren  
planen rekonstruieren  
stimulieren testen  
trainieren untersuchen  
vermitteln vorbereiten üben

hat Subjekt

Computer  
Computerprogramm  
Experiment Forscher  
Gerät Kollege Maschine  
Physiker Pilot  
Programm Rechner  
Schauspieler Software  
Spiel Student System  
Techniker Teilnehmer  
Wissenschaftler Übung

**Wer simuliert?**

**Wie wird simuliert?**

hat Adverbialbestimmung

annähernd anschließend  
beispielsweise bloß  
erfolgreich etwa exakt  
lang lediglich mit Hilfe  
möglich naturgetreu  
numerisch perfekt  
realistisch realitätsnah  
vollständig vorher  
wenigstens überzeugend

hat Akk./Dativ-Objekt

Ablauf Alterungsprozess  
Aufprall Ausbreitung  
Authentizität Bewegungsablauf  
Entstehung Ernstfall  
Evolution Explosion Flug  
Kollision Mithilfe  
Schwereelosigkeit  
Szenarium Urknall  
Verhalten Vorgang

**Was wird simuliert?**

# Historische Nutzung von Modellierung / Simulation

- Landkarten, Globus

- Modell der Welt

- Sandkastenspiele

- Beim Militär



- Entwurfsmodelle

- Z.B. Architekturmodelle



- Formalisierung der Physik

- Differentialgleichungen (z.B. Modelle des Wetters bzw. der zugrundeliegenden physikalischen Parameter und Gesetze dafür) sowie mechanische Instrumente und Analogcomputer zu ihrer approximativen Lösung

- Modellrechnungen mit Digitalcomputern ab ca. 1945

- Zunächst militärische, dann technische und ökonomische Anwendungen

# Typische Einsatzbereiche von Simulation

- Meteorologie, Klimaforschung
- Naturwiss. Grundlagenforschung (Physik, Chemie,...)
- Ökologie, Biologie
- Volkswirtschaft
- Verkehrsplanung
- Industrielle Fertigung, Logistik
- Militär
- ...

Typische Fragestellungen bzgl. wirtschaftlich relevanter Ziele der Logistik: z.B. Durchlaufzeitminimierung, Servicegradmaximierung, Auslastungsmaximierung und Bestandsminimierung.

"Estimates range from \$4 billion to \$7.5 billion spent each year by the U.S. Department of Defense on Modeling and Simulation (M&S) tools, processes, and products. [...] In July 2007, U.S. House Resolution 487 officially recognized M&S as a National Critical Technology." [National Training and Simulation Association, 2011]

Beispiele →



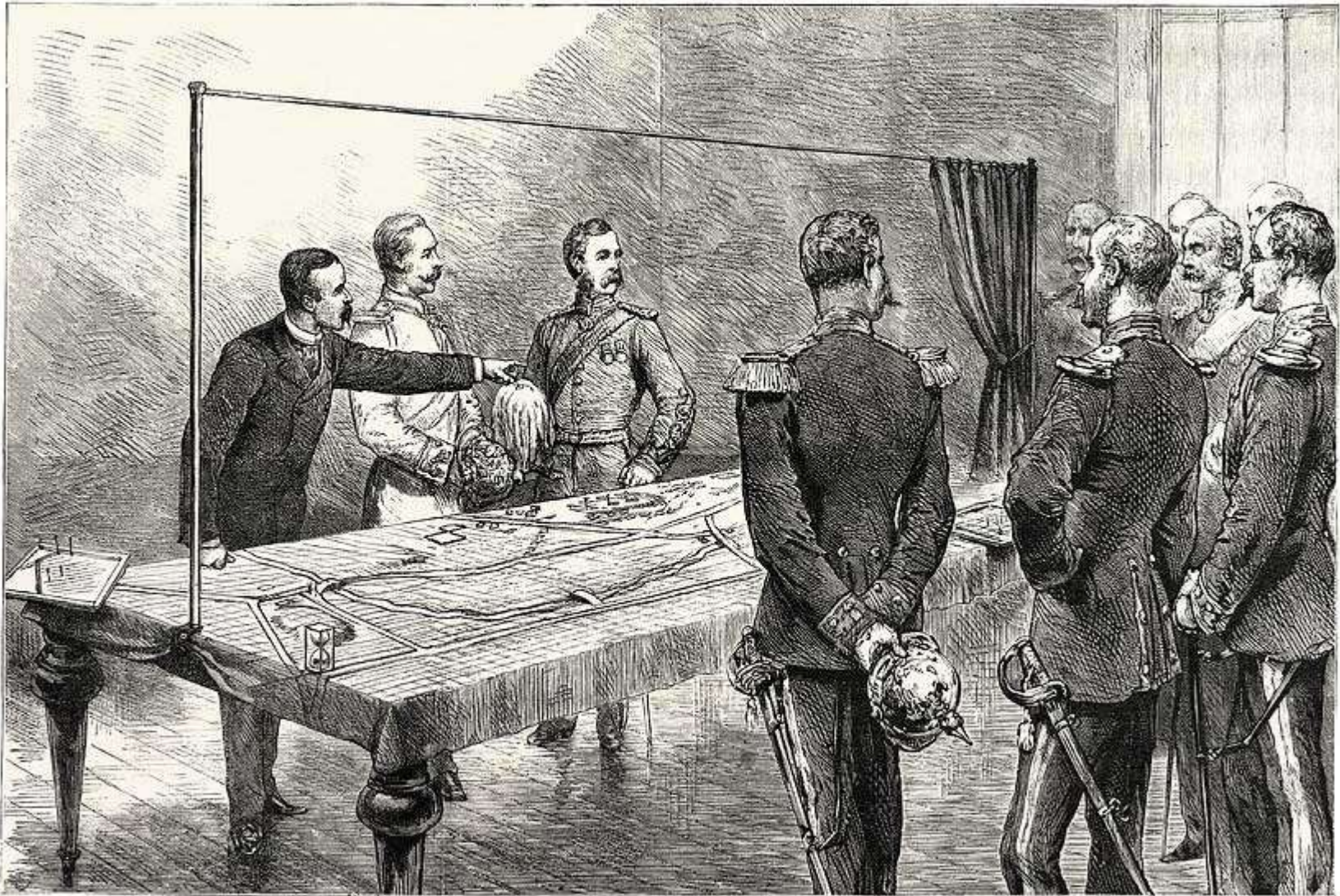
# Beispiel: Historische „Kriegsspiele“



*The Royal Navy during the Second World War: Officers in the Plot Room at the Admiralty.*



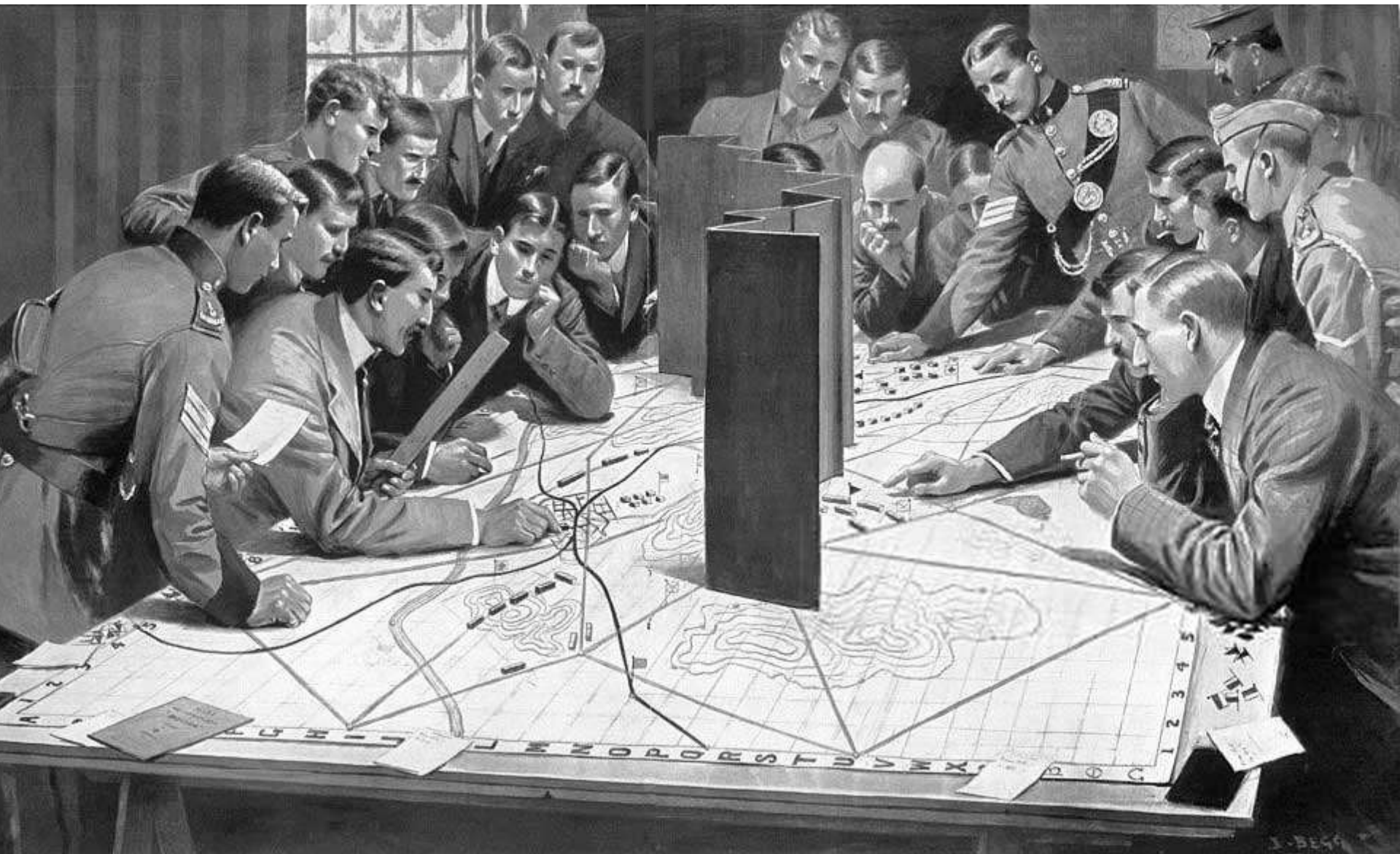
# Militärische Planspiele noch ohne Computer



Revue L'illustration Européenne N° 22, 1 Mars 1891



# Militärische Planspiele noch ohne Computer



# Wargames mit Computer

Das Durchrechnen eine Gefechts bezeichnen wir als ein Spiel. -- Carl August Zehnder



Sobald Computer in praktischer Hinsicht dafür nutzbar waren, wurden sie im Rahmen solcher Kriegsspiele (quasi als „elektronische Sandkästen“) eingesetzt – wie hier 1959 beim Heer der US-Streitkräfte:

*The picture highlights a current computer application to a U.S. Army wargame problem. The game is used to evaluate the feasibility of operational and organizational concepts; it is played manually by two opposing teams maneuvering on a map.*

[www.bitsavers.org/pdf/computersAndAutomation/195912.pdf](http://www.bitsavers.org/pdf/computersAndAutomation/195912.pdf)



# Panzergefechtssimulation mit Computer

Codename „KOMPASS“: KOMputerisierte PanzerAbwehrSchlachtSimulation

Auszüge aus: Jürg P. Marty: „KOMPASS - Taktisches Gefechtssimulationsmodell“ (1984/85):

---

Bei KOMPASS handelt es sich um ein Modell zur Simulation von Begegnungsgefechten zwischen Panzern / Schützenpanzern und der Panzerabwehr, beide unterstützt durch Artillerie, Minen und Hindernisse in einem wirklichen, digitalisierten Gelände. Die Ziele eines Einsatzes des Systems sind Waffensystemevaluation, taktische Operationsanalyse, Schulung der Kader.

KOMPASS stellt ein für das schweizerische Milizsystem typisches EDV-Projekt dar. Als Forschungsprojekt an der ETH Zürich „geboren“, iterativ in mehreren Phasen und im Wechselspiel zwischen Hochschulen, Militärverwaltung, Truppe und Industrie „gewachsen“, ist es schliesslich als Teilprojekt eines Führungssystems der Truppe übergeben worden.

Die Gefechtsfähigkeit und die Bewegung aller Elemente im Gelände werden durch das Programm zu einer Gefechtssimulation vereinigt. Das Gefechtsmodell besteht aus verschiedenen Kampfelementen, die sich in einem zeitlich veränderlichen Zustand befinden und die zeitabhängige Aktivitäten durchführen, welche den eigenen Zustand und denjenigen anderer Elemente verändern. Es handelt sich bei KOMPASS um eine Zeitfolgesimulation, welche alle 1/8 Sekunden sämtliche Systemzustände nachführt. Die Simulation wird dabei durch *Tätigkeiten* und *Ereignisse* gesteuert.

- Die Aktivität eines Kampfelements löst eine Folge von Tätigkeiten aus.
- Jede Tätigkeit hat eine *Anfangszeit*, eine *Zeitdauer* und eine *Endzeit*.
- Jede Tätigkeit beginnt nach und endet mit einem *Ereignis*.
- Ein Ereignis kann *deterministisch* oder *stochastisch* (Eintreffenswahrscheinlichkeit) sein.
- Ein Ereignis kann die Veränderung des Zustandes oder die Auslösung der Aktivität eines Kampfelementes bewirken.



# Panzergefechtssimulation mit Computer (2)

Das Model baut in Schritten von 1/8 Sekunden die so entstandene Ereignisfolge ab. Anders ausgedrückt: Jedes Element trägt einen „Wecker“, eine Uhr der Verfügbarkeit, bei sich. Wenn ein Element etwas zu tun hat (z.B. Laden), wird sein Wecker um die dafür benötigte Zeit vorgesetzt. Während dieser Zeit ist dieses Element damit voll beschäftigt, hingegen sind andere Elemente verfügbar. Der Computer kann nun in der zeitlichen Reihenfolge immer das nächstverfügbare Element betrachten und untersuchen, welche Tätigkeit jetzt auszuführen ist (bei einem Panzer z.B.: soll er fahren, soll er schießen, soll er stehenbleiben usw.) und dem entsprechenden Element eine Tätigkeit zuweisen und dann zum nächstverfügbaren Element übergehen.

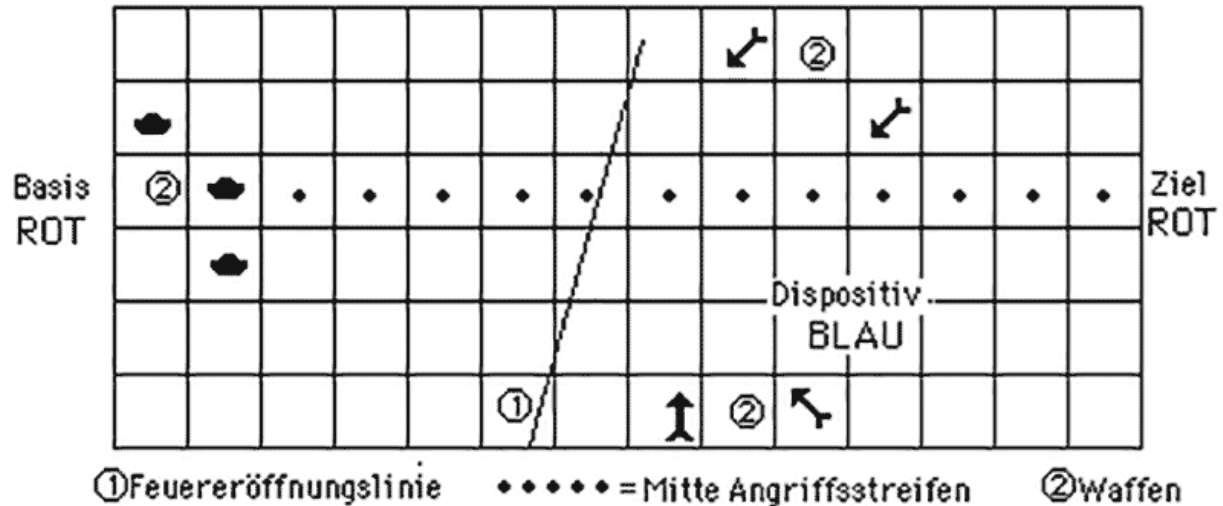
Mit diesem Verfahren werden simultan die verschiedenen Elemente im Rahmen ihrer Gefechtstätigkeit verfolgt, ihre gegenseitigen Beeinflussungen realisiert und das Gefecht vorangeführt.

Beispiele für „Gefechtsmeldungen“ während einer Online-Simulation:

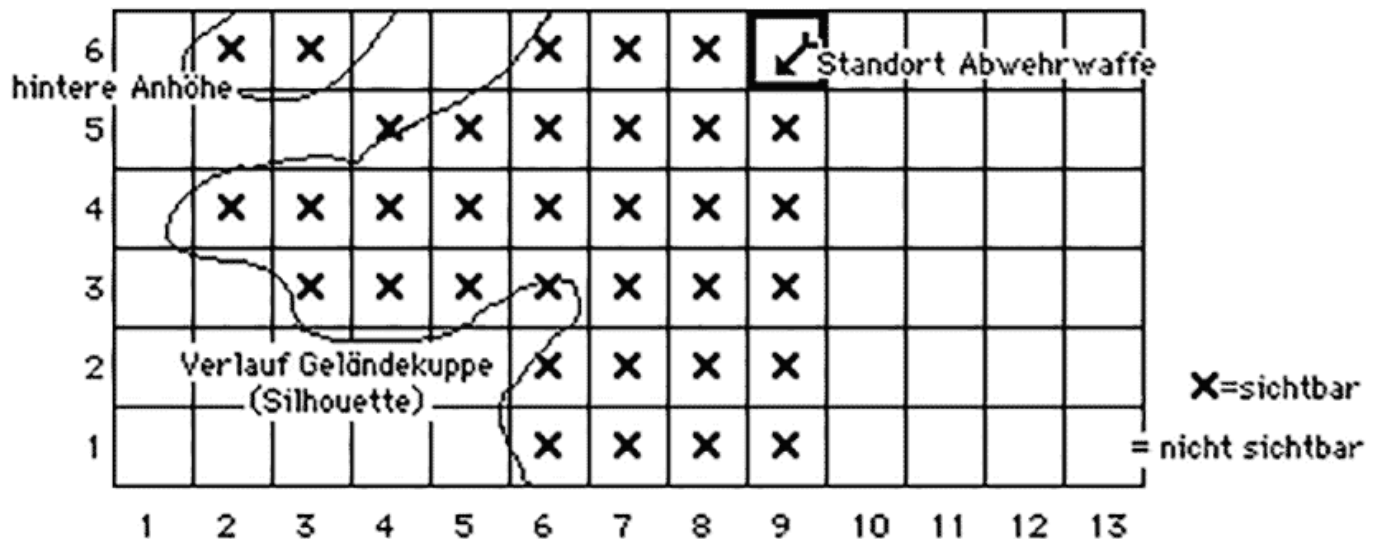
```
* 1:17:04/1 PZ 2001 HAT MINENFELD( 75/410) BESEITIGT
* 1:17:17/3 PZ 2033 HAELT VOR MINENFELD( 77/400) FINDET WEG ZUM EIGENEN ZWZ
* 1:17:22/2 PZ 2001 ERREICHT ZWZ 2000 (FELD 73/413)
* 1:17:22/5 PZ 2031 ( 77/402 ZUST=I) GETROFFEN(ZUST=Z) VON AW ( 74/404)
>
* 1:18:06/4 PZ 2033 ( 78/400) ERKENNT BESCHOSSENE AW ( 74/404) ALS ZERSTOERT
>
* 1:18:22/5 PZ 2023 ( 75/410) ERKENNT BESCHOSSENEN PZ ( 70/433) ALS ZERSTOERT
* 1:18:26/3 PZ 2001 ( 73/414 ZUST=S) GETROFFEN(ZUST=Z) VON AW ( 74/429)
* 1:18:28/7 PZ 2021 ( 76/409 ZUST=I) GETROFFEN(ZUST=Z) VON AW ( 77/427)
```

# Panzergefechtssimulation mit Computer (3)

*KOMPASS-Spielfeld mit Beispielen von Simulationselementen (hier: Panzer, Panzerabwehrkanonen) und Taktikangaben (hier: Angriffsstreifen, Feuereröffnungslinie).*



*Sichtbereich, berechnet für einen bestimmten Standort (9,6) einer Abwehrwaffe in Abhängigkeit vom Geländere relief.*



# Panzergefechtssimulation mit Computer (4)

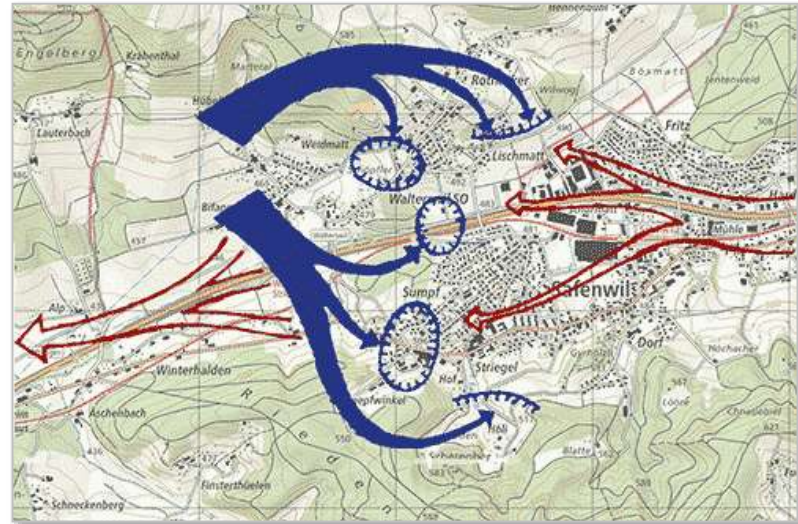
Das Kampfgebiet besteht aus einem rechteckigen Kartenausschnitt von 7 x 10 km. Es wird, ausgehend von der Landeskarte, in einer Spezialkarte 1:10'000 dargestellt. Auf dieses Rechteck wird ein quadratischer Raster von 50 x 50 m gelegt.

KOMPASS wird als zweiseitiges, verdecktes, computergestütztes interaktives Kriegsspiel gespielt. Die Spielpartner sind dabei:

- Übungsleitung
- Abwehr (BLAUE Partei)
- Angreifer (ROTE Partei)

Aufgrund von im voraus festgelegten Abwehrdispositiven und Panzer-Kampfplänen berechnet KOMPASS den Verlauf des Gefechtsgeschehens und liefert Datenmaterial, Statistiken und Grafiken über den Ausgang des Gefechts. Zur Auswertung können die Wege jeder Kompanie und die wesentlichen Ereignisse detailliert auf einer Landkarte aufgedruckt, eine grafische Darstellung der Verluste beider Seiten sowie eine Statistik über die Wirksamkeit der Verteidigung erstellt werden.

Die bisher durchgeführten Truppeneinsätze haben gezeigt, dass KOMPASS einerseits zur taktischen Führerschulung und andererseits auch zur systematisch wissenschaftlichen Durchleuchtung des Gefechtsgeschehens einen wesentlichen Beitrag liefert. Verbesserungen der Abwehrwirksamkeit von teilweise über 20% sind durchaus realisierbar und sind auch realisiert worden.



*Die Schlacht von Safenwil (AG) und Walterswil (SO)*

*[Ende der Auszüge aus dem Text von Jürg P. Marty]*

# Panzergefechtssimulation mit Computer (5)

Das KOMPASS-Simulationsmodell wurde ab 1963 im Wesentlichen an der ETH Zürich in der Gruppe von Prof. Eduard Stiefel (militärisch Chef des Artilleriewetterdienstes) entwickelt. Neben fest zugeordneten Assistenten des Instituts arbeiteten auch andere Institutsmitarbeiter im Rahmen ihres militärischen Wiederholungskurses an der Entwicklung mit. Erste Konzepte entstanden noch auf der ERMETH, ab 1964 wurde diese Maschine jedoch durch die 400 Mal schnellere CDC 1604A auf Transistorbasis ersetzt.

Ausgangspunkt war die Frage von militärischer Seite an die akademischen Fachleute des noch jungen Gebietes „Operations Research“: Lässt sich in Hinblick auf anstehende Panzer- und Panzerabwehrwaffenbeschaffungen der Nutzen verschiedener Waffentypen rechnerisch vergleichen? Konkrete Fragen waren etwa: Welcher Panzertyp nützt der Schweizer Armee mehr, (a) ein schnellfahrender, leichter Panzer mit kleiner Feuergeschwindigkeit oder (b) ein schnellschiessender Panzer mit Stabilisator und grösserem Gewicht aber kleinerer Fahrgeschwindigkeit?

Viele weitere, oft voneinander abhängige Entscheidungsgrössen (Kaliber, Verwundbarkeit etc.), mussten zur Beantwortung des Nutzen berücksichtigt werden. Da keine einfachen analytischen Methoden zur Behandlung solcher Fragen existieren, wurde das KOMPASS-Simulationsmodell zur experimentellen Untersuchung verschiedener Varianten konzipiert.

Obwohl ursprünglich zum Zweck der Waffenevaluation geschaffen, ergaben sich bald andere, geeignetere Nutzungen wie die Evaluation von Kampfplänen oder die taktische Ausbildung in der Führung von Panzer- bzw. Panzerabwehrkämpfen.

[Quelle: Carl August Zehnder (1992): Frühe Gefechtssimulationen in der Schweiz.]

# Panzergefechtssimulation mit Computer (6)

Zur Anwendung des KOMPASS-Simulationssystems noch folgender Textauszug von 1965:

## Prinzip der Benützung

-----

Das Modellprogramm KOMPASS ist heute (November 1965) einsatzbereit für den Computer CDC-1604A des Rechenzentrums der ETH, Zürich. Jeder militärische Interessent wendet sich aber betreffend Benützung an die Sektion Studien und Finanzplanung der Untergruppe Planung der Generalstabsabteilung. Diese regelt die Benützung und liefert den Interessenten eine ausführliche Gebrauchsanweisung.

## Technische Vorbereitungen des Benützers

-----

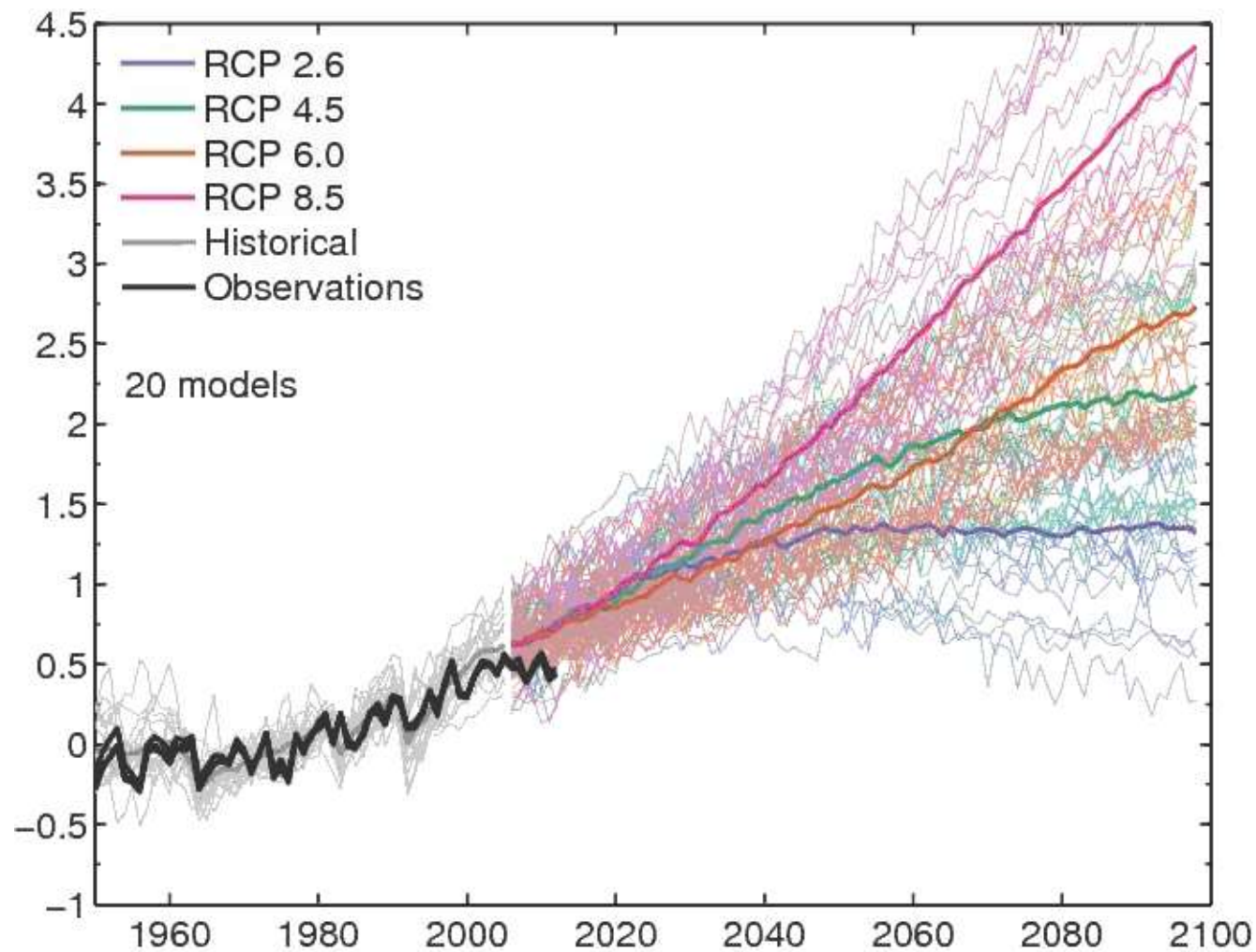
Auf Grund der erwähnten Gebrauchsanweisung muss der Benützer das von ihm bestimmte Gelände, die technischen Daten der Waffen und die gefassten Parteientschlüsse zahlenmässig in Formulare eintragen. Sind alle verlangten Angaben beisammen, so sind diese - wiederum genau nach Anweisung - auf Lochkarten zu übertragen. Diese Lochkarten werden mit dem (bereits auf Lochkarten vorrätigen) Programm KOMPASS dem Computer eingegeben.

Für das Zusammenstellen aller Angaben ist ein Aufwand von ca. 25 Stunden nötig, wobei das Gelände weitaus am meisten Arbeit gibt. Das einmal erfasste Gelände ist aber nachher für viele Modellgefechte wieder verwendbar. Die totalen Locharbeiten (für etwa 500 Lochkarten, je nach Gelände grösse) lassen sich in einem Tag erledigen; sie bedingen die Verwendung eines Lochkartenstanzers, wie er heute vielerorts vorhanden ist.

Ende der historischen Notiz

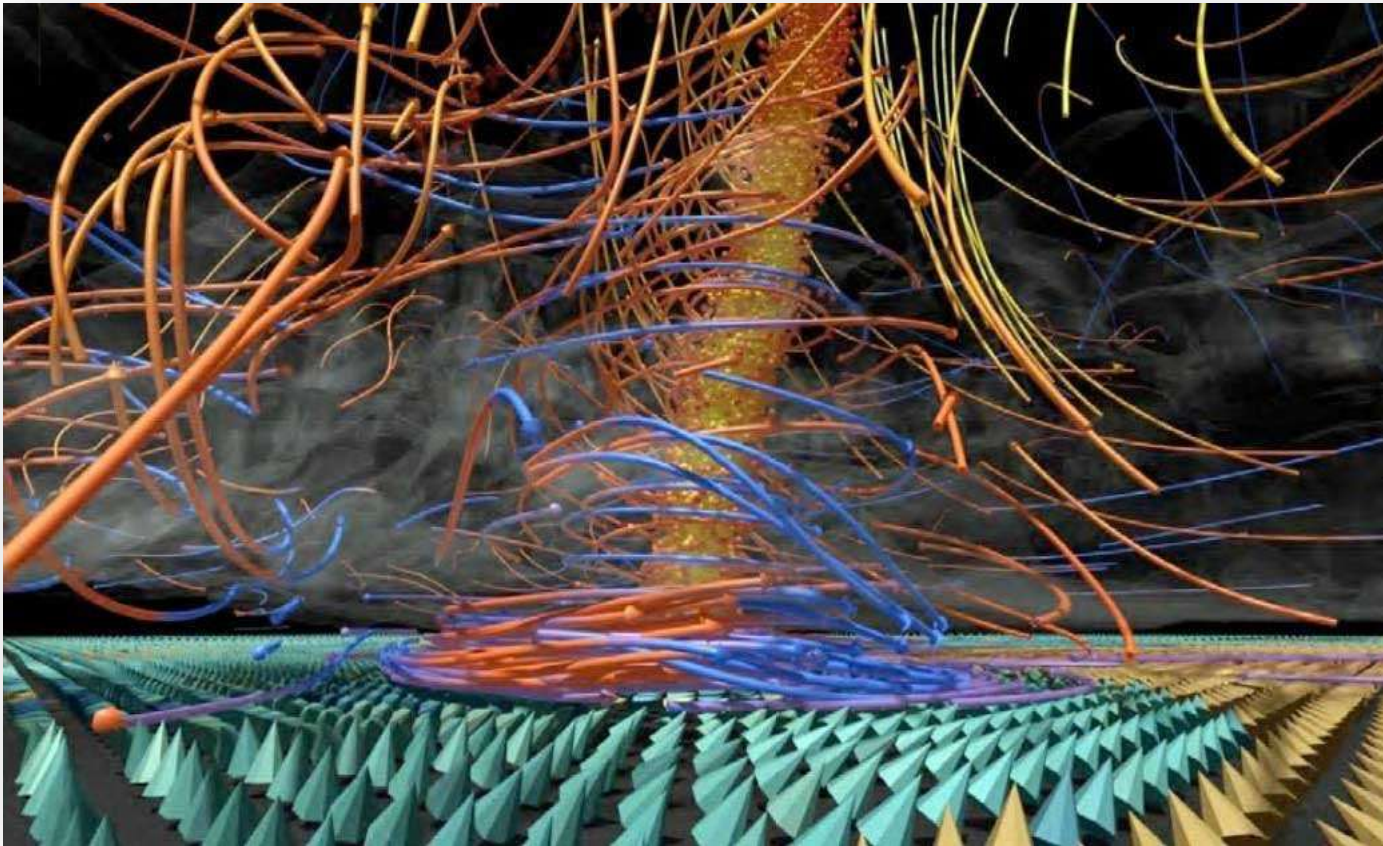


# Beispiel: Simulation diverser Klimaszenarien (Temperaturentwicklung)



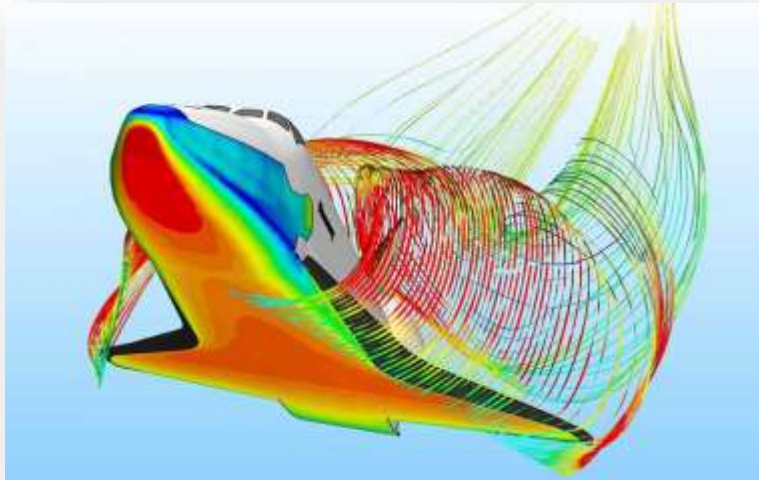
<http://rogerpielkejr.blogspot.ch/2013/02/science-is-shortcut.html>

# Beispiel: Simulation eines Tornados (Spaghetti-Simulation)

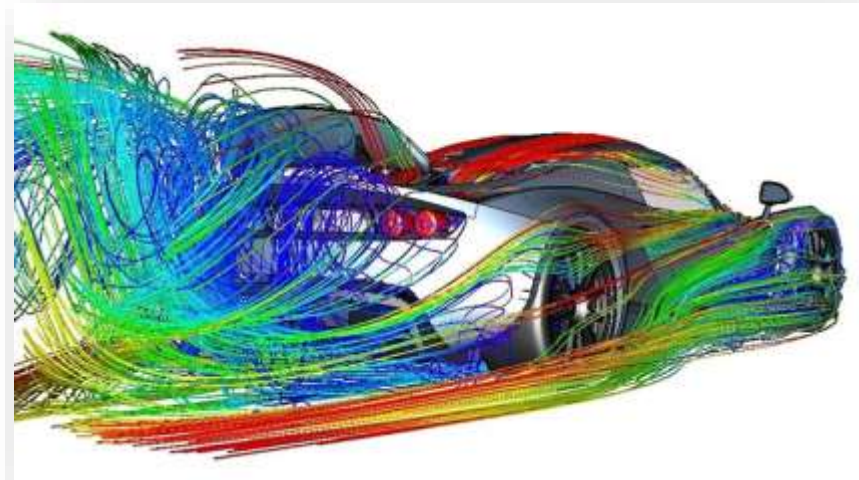




# Beispiel: Strömungssimulation



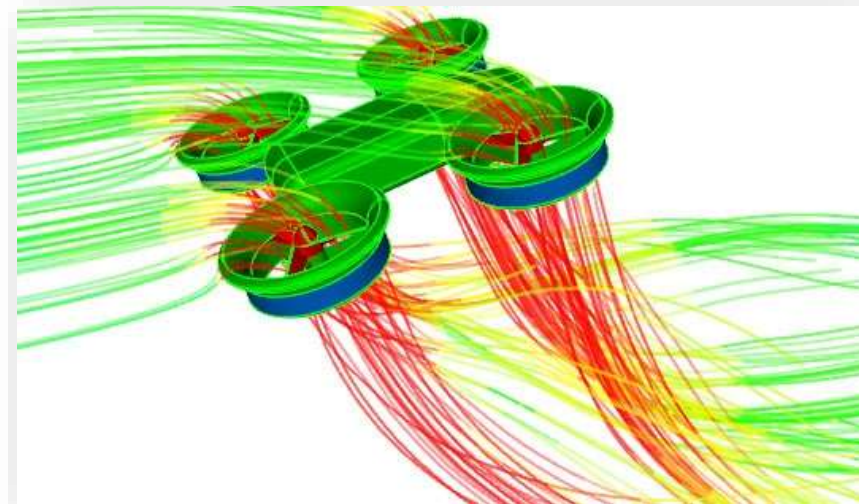
<https://horizontalspace.files.wordpress.com/2017/03/shut4.jpg>



<http://cdn3.worldcarfans.co/2009/9/large/2131299.jpg>

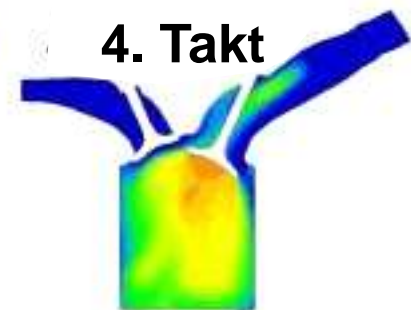
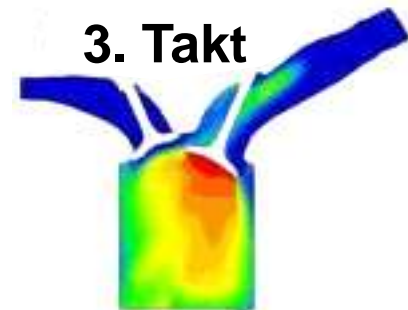
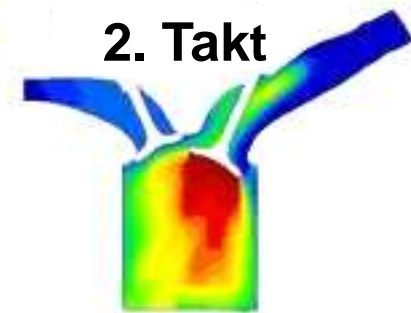
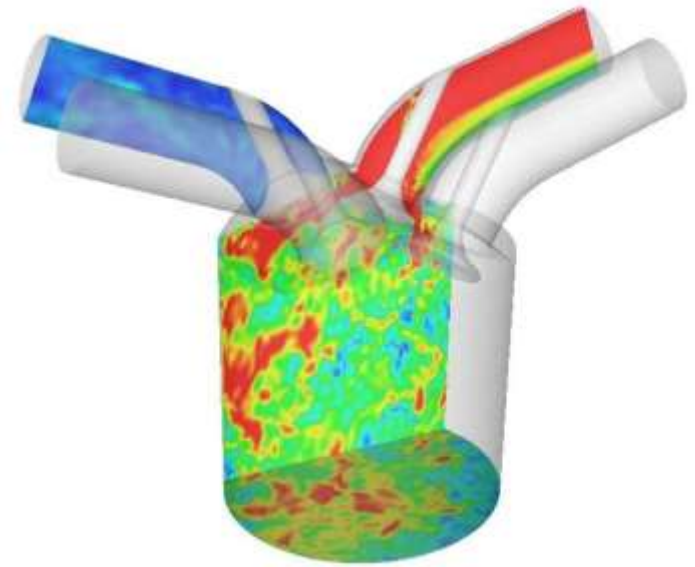
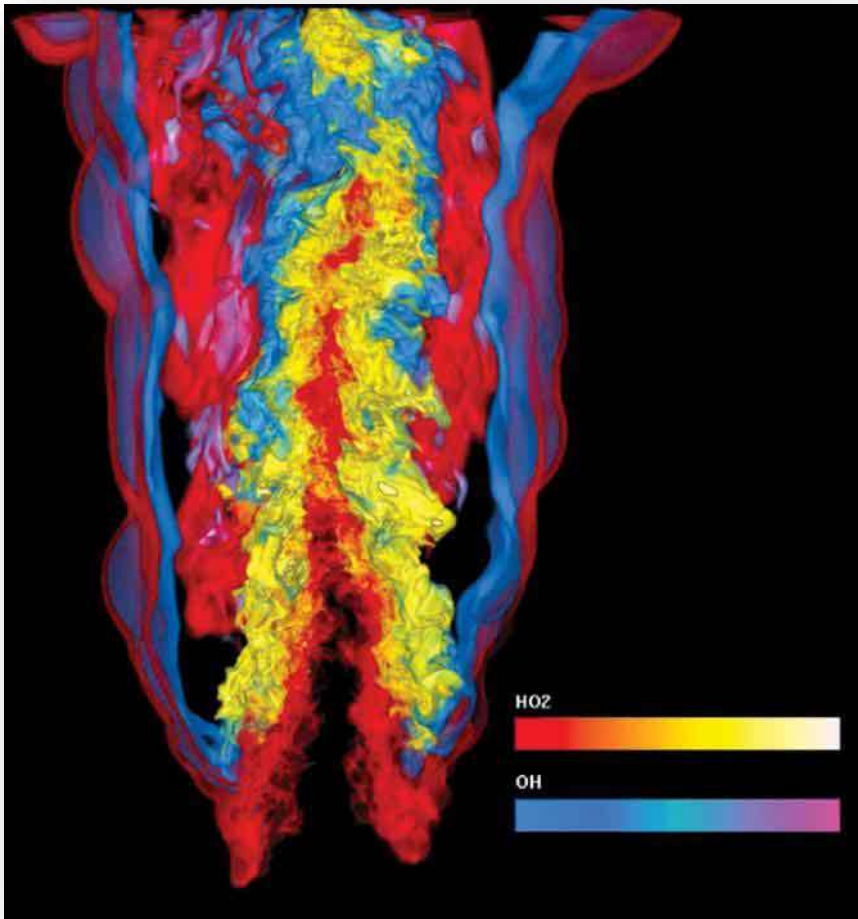


[http://pedalista.net/wp-content/uploads/2017/02/20170201\\_0.jpg](http://pedalista.net/wp-content/uploads/2017/02/20170201_0.jpg)



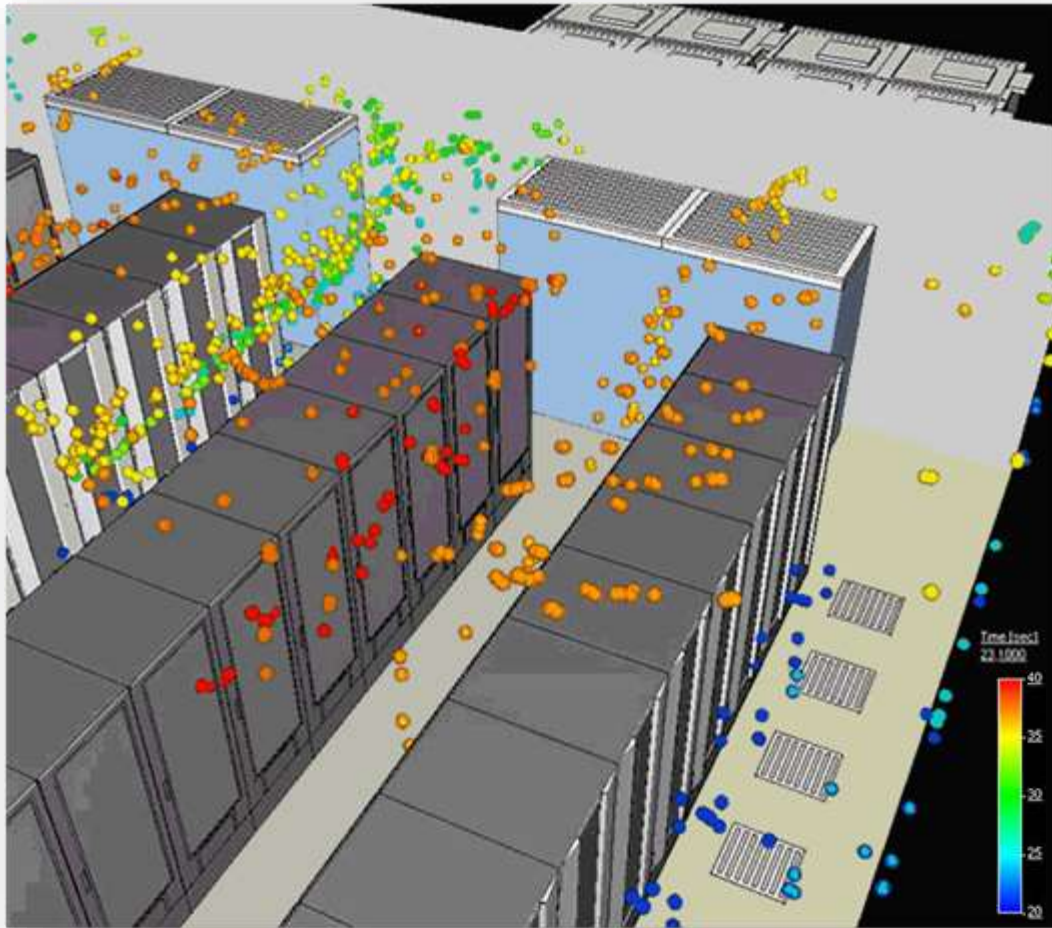
[www.symscape.com/files/pictures/unconventional-concepts/quadcopter.png](http://www.symscape.com/files/pictures/unconventional-concepts/quadcopter.png)

# Beispiel: Simulation von Verbrennungsvorgängen





# Beispiel: Simulation der Kühlung von Servern



<http://static.datacenterdynamics.com/assets/image/0004/235147/Simulation-of-thermal-flows-in-datacenter.jpg>



# Beispiel: Interaktiver Verkehrssimulator

The screenshot displays the PTV Vissim software interface, which is used for traffic simulation. The main window is divided into several panels:

- Network Editor (2):** A 3D perspective view of a simulated urban intersection with buildings, trees, and vehicles (cars, a bus, and a truck) moving through the network.
- Network Objects:** A list of various traffic simulation objects such as 'Desired Speed Detail', 'Reduced Speed Areas', 'Conflict Areas', 'Priority Rules', 'Stop Signs', 'Signal Heads', 'Detectors', 'Vehicle Inputs', 'Vehicle Routes', 'Parking Lots', 'Public Transport Stop', 'Public Transport Lines', 'Nodes', 'Data Collection Points', 'Vehicle Travel Time M', 'Queue Counters', 'Background Images', 'Pavement Markings', '3D Traffic Signals', 'Static 3D Models', 'Vehicles In Network', 'Pedestrians In Network', 'Areas', 'Obstacles', 'Ramps & Stairs', 'Pedestrian Inputs', 'Pedestrian Routes', and 'Measurement Areas'.
- Links:** A table listing the network links with their properties. The table has columns for Count, No, Name, BehaviorType, DisplayType, NumLanes, Length3D, IsConn, FrontLink, ToLink, Gradient, LinkEvalAct, LinkEvalSegLen, and AvgLinkEvalSegs.
- Vehicles In Network:** A table showing the current state of vehicles in the simulation, including Count, No, and Speed.
- Smart Map:** A small overview map showing the location of the current view within the larger network.

Count	No	Name	BehaviorType	DisplayType	NumLanes	Length3D	IsConn	FrontLink	ToLink	Gradient	LinkEvalAct	LinkEvalSegLen	AvgLinkEvalSegs
15	15	1: Urban (motorized)	11: Road gray (invisible)	3	80.201					0.00		10.0	
16	16	1: Urban (motorized)	1: Road gray	2	201.077					0.00		10.0	
17	17	1: Urban (motorized)	1: Road gray	3	58.856					0.00		30.0	
18	18	1: Urban (motorized)	11: Road gray (invisible)	1	48.596					0.00		10.0	
19	19	1: Urban (motorized)	1: Road gray	2	9.443					0.00		10.0	
20	20	1: Urban (motorized)	21: Tram (Road)	1	2.255					0.00		10.0	
21	21	1: Urban (motorized)	1: Road gray	2	234.379					0.00		10.0	
22	22	1: Urban (motorized)	1: Road gray	1	9.639					0.00		10.0	

Count	No	Speed
1	2	65.12
2	3	0.00
3	4	0.00
4	7	3.31
5	10	52.42
6	16	60.34
7	18	4.02
8	20	18.89

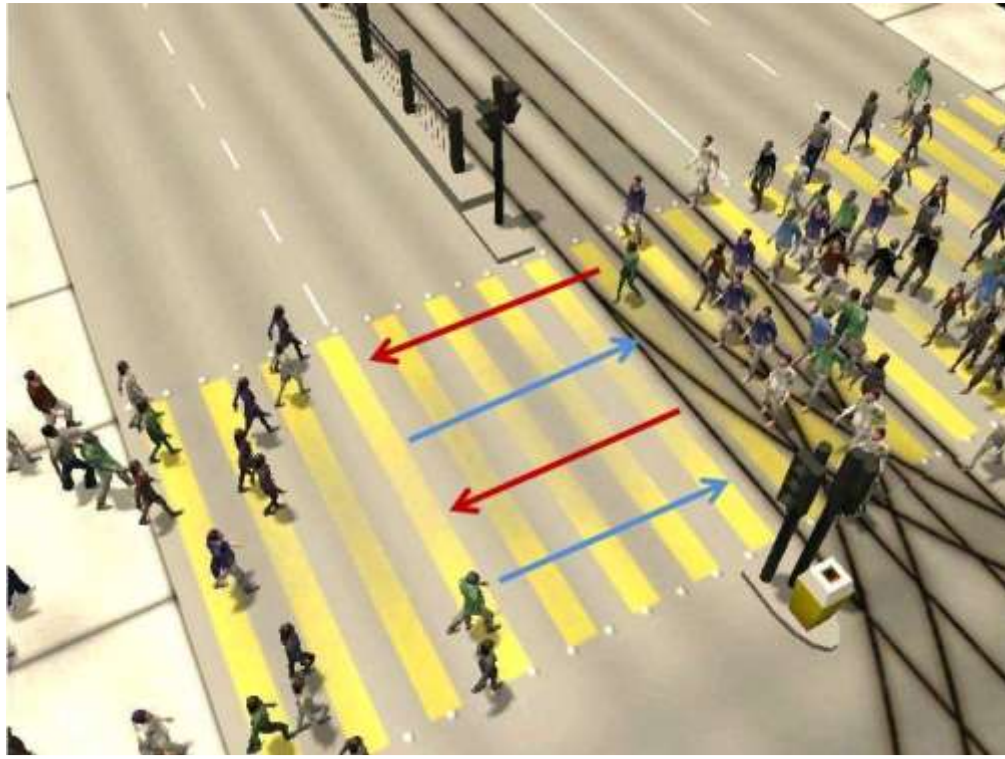
PTV Group, [www.traffic-inside.com/tag/traffic-simulation/](http://www.traffic-inside.com/tag/traffic-simulation/)

# Beispiel: Verkehrssimulation (Autos)



[www.ib-hurrle.de/Simula\\_Bild.jpg](http://www.ib-hurrle.de/Simula_Bild.jpg)

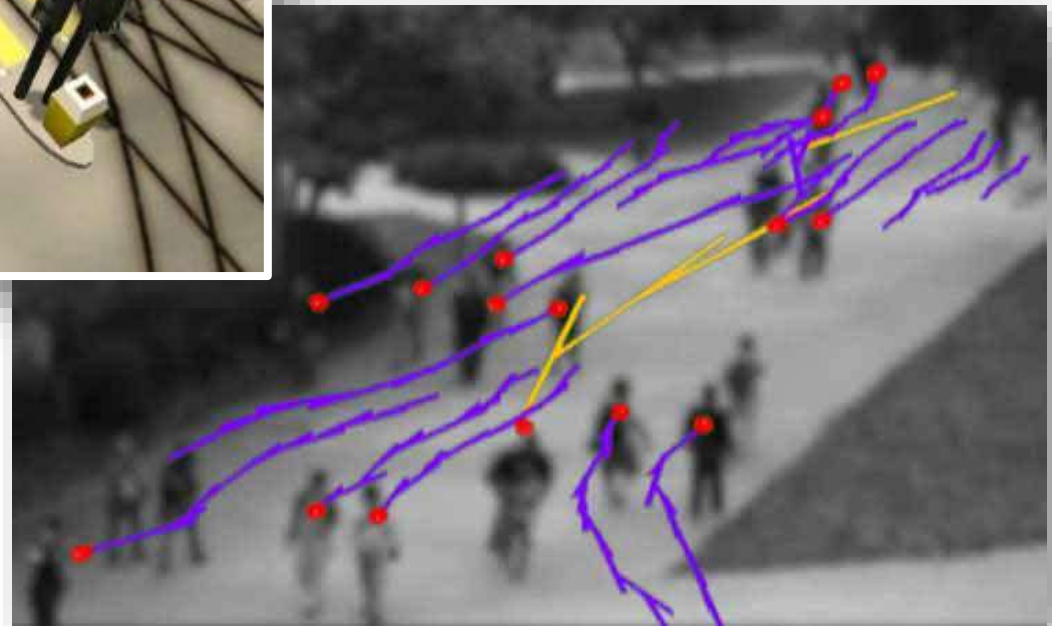
# Beispiel: Verkehrssimulation (Fussgänger)



<http://gamma.cs.unc.edu/DCrowd/images/crosswalkUserInput.jpg>

[www.cs.unc.edu/~ab/\\_include/img/profile/anomaly.png](http://www.cs.unc.edu/~ab/_include/img/profile/anomaly.png)

Crowd-Simulation





# What if a nuke goes off in Washington, D.C.?

## Simulations of artificial societies help planners cope with the unthinkable



On a Monday morning in May, an ordinary looking delivery van rolls into the intersection of 16th and K streets NW in downtown Washington, D.C., just a few blocks north of the White House. Inside, suicide bombers trip a switch. Instantly, most of a city block vanishes in a nuclear fireball. Powered by 5 kilograms of highly enriched uranium that terrorists had hijacked weeks earlier, the blast smashes buildings for at least a kilometer in every direction and leaves hundreds of thousands of people dead or dying in the ruins. An electromagnetic pulse fries cell-phones within 5 kilometers, and the power grid across much of the city goes

dark. Winds shear the bomb's mushroom cloud into a plume of radioactive fallout that drifts eastward...

The NPS1 [National Planning Scenario 1] model includes a digital simulation of every building in the area affected by the bomb, as well as every road, power line, hospital, and even cell tower. The model includes weather data to simulate the fallout plume. And the scenario is peopled with some 730,000 agents—a synthetic population statistically identical to the real population of the affected area in factors such as age, sex, and occupation. Each agent is an autonomous subroutine that responds in reasonably human ways to other agents and the evolving disaster by switching among multiple modes of behavior—for example, panic, flight,...

Each of the model's initial runs kept a 500-processor computing cluster busy for a day and a half.

[www.sciencemag.org/news/](http://www.sciencemag.org/news/)

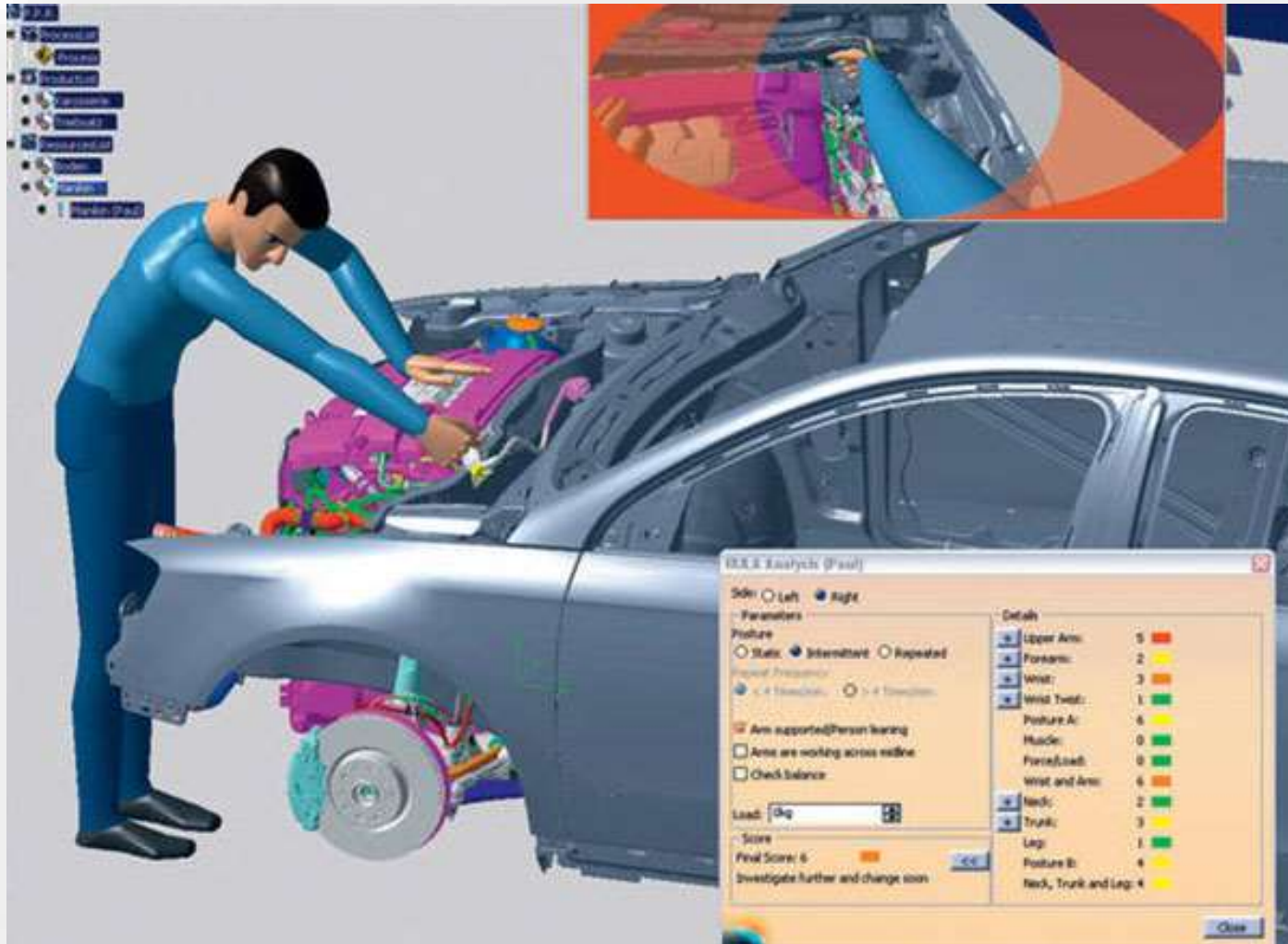
# Beispiel: Ambulanzsimulation (Wartezeit)



<https://jasongoto.files.wordpress.com/2011/11/picture5a2.png?w=984>

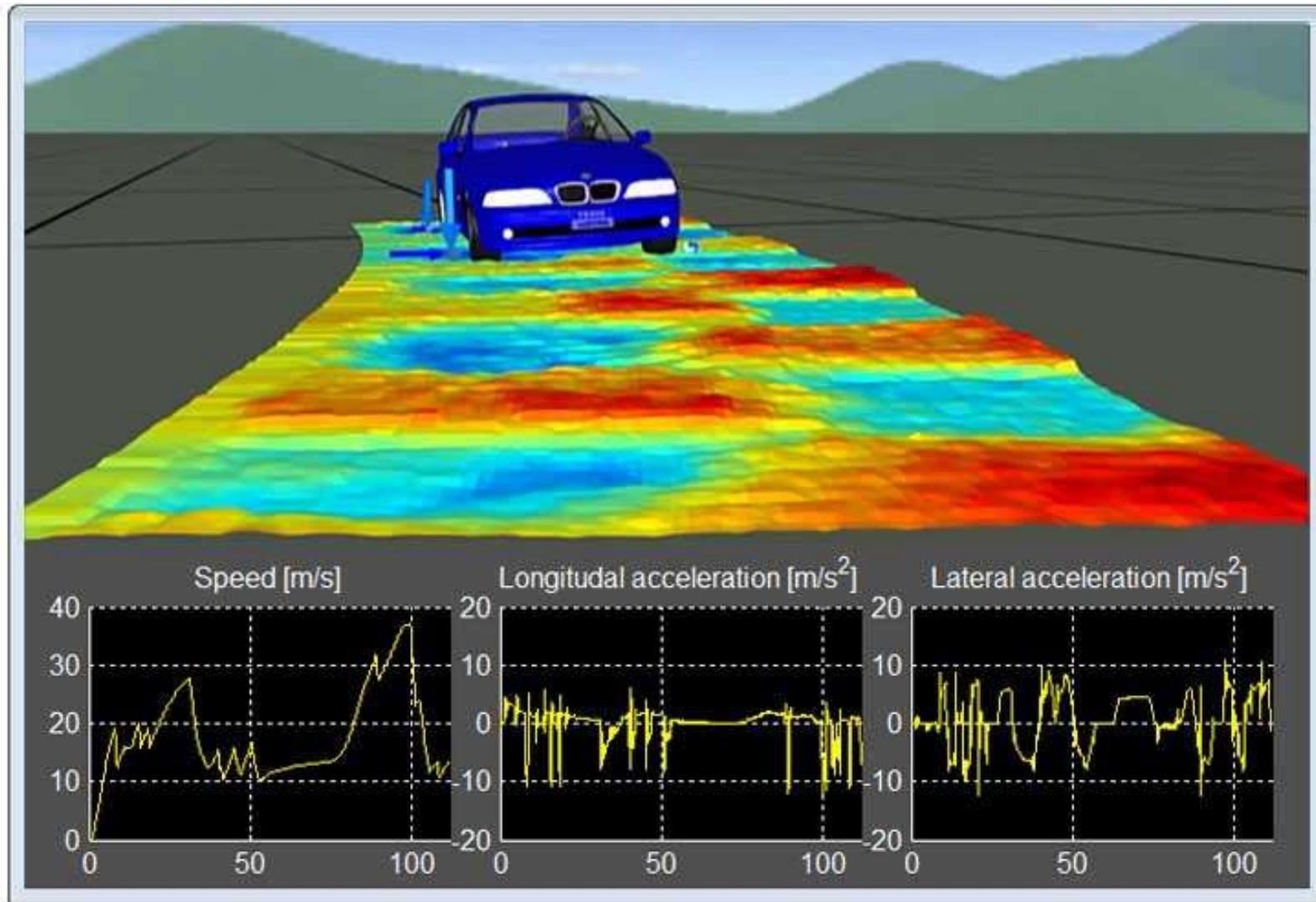


# Beispiel: Fertigungssimulation

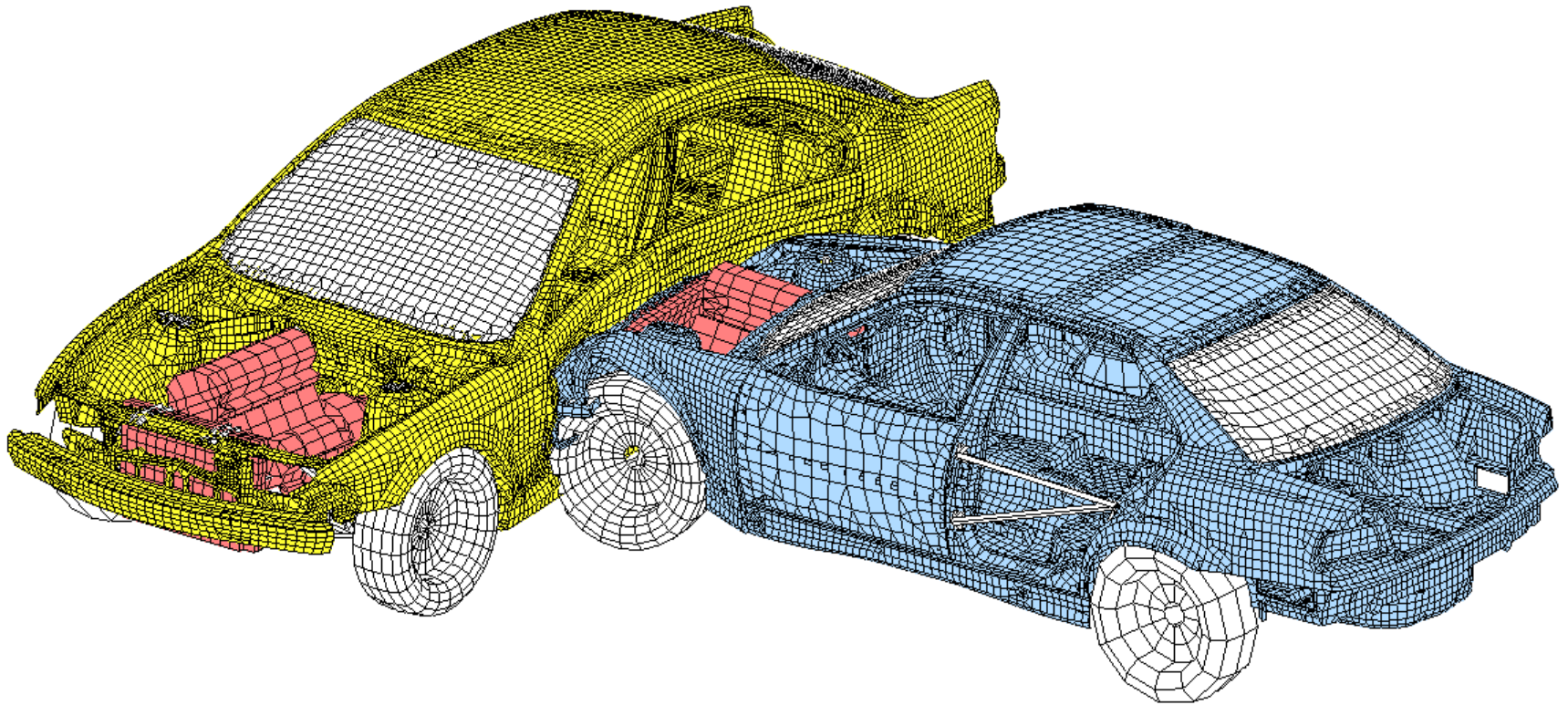


[www.ea-online.de/xml-import/bilder/ia/2007-52/600x/thumb\\_ia52070184.tif.jpg](http://www.ea-online.de/xml-import/bilder/ia/2007-52/600x/thumb_ia52070184.tif.jpg)

# Beispiel: Fahrdynamiksimulator



# Beispiel: Crash-Simulation



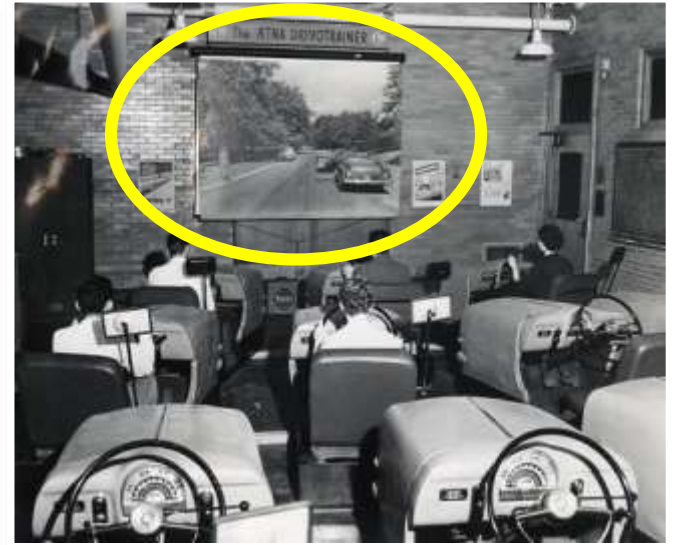


# Beispiel: Fahrsimulator (1950er-Jahre)

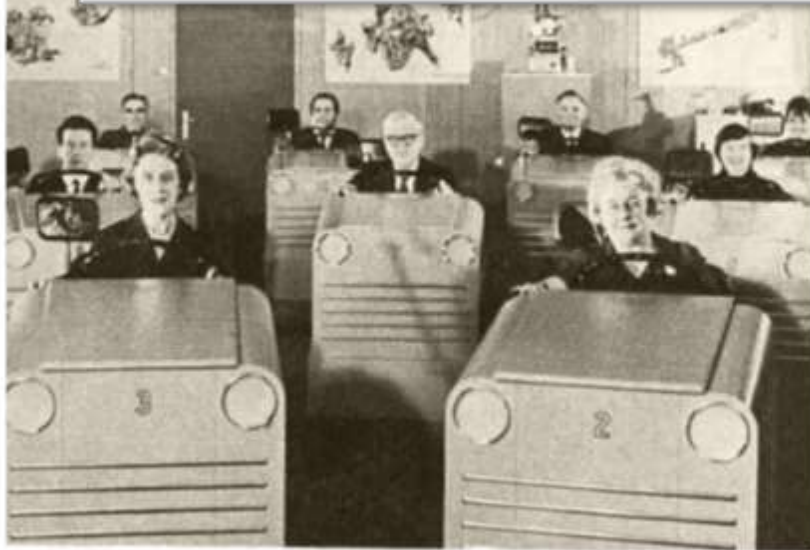




# Beispiel: Fahrsimulator (1950/60er-Jahre)



“Students at Brooklyn High School in New York learn to handle the controls of a car and experience **simulated traffic conditions** flashed onto a screen by means of **projected film**.”



**Der große Vorteil dieser modernen Fahrschule ist der gemeinsame Fahrunterricht, der allen Kursteilnehmern die Angst vor dem ersten Schritt auf der Straße nimmt.**



**Während ein Lehrfilm der Fahrschulklasse die grundlegende Instruktion vermittelt, hat der Fahrschullehrer Zeit, den einzelnen Kursteilnehmern zu helfen und sie zu korrigieren.**



# Beispiel: 3D-Fahrsimulatoren



Mercedes-Benz, 1985



# Beispiel: VR-Fahrsimulatoren





# Beispiel: Schiffsführungssimulator



# Beispiel: Velofahrersimulator



<https://psychology.uiowa.edu/sites/psychology.uiowa.edu/files/groups/hank/images/04bike3.jpg>



## Beispiel: Reitsimulator (ca. 1910)



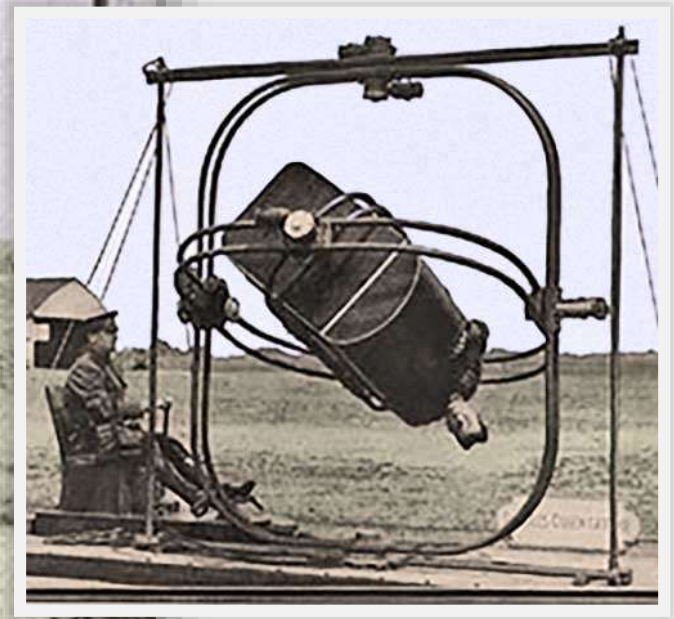
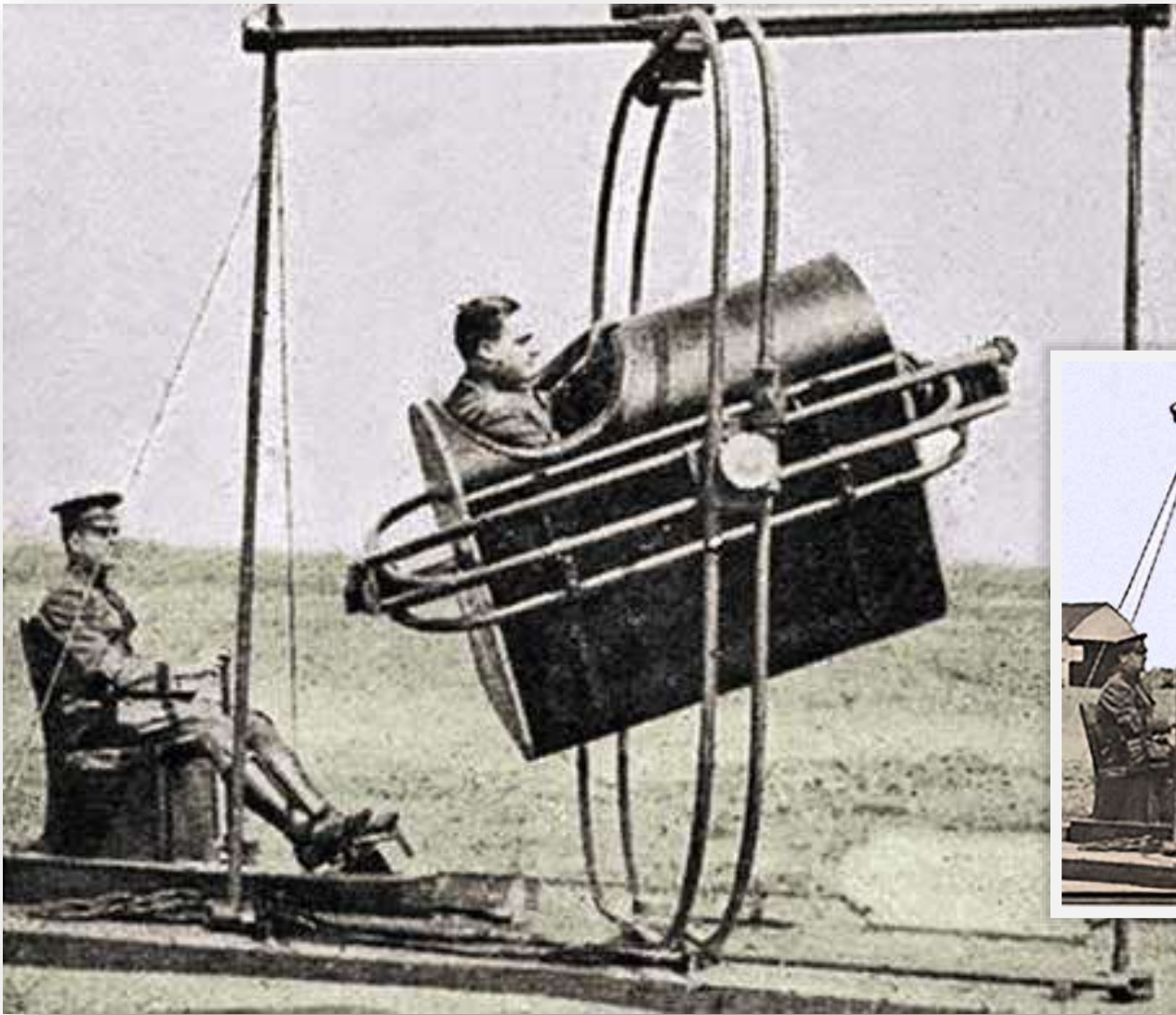
Mounted on rocking-horses, recruits of the British cavalry are now receiving preliminary training in horsemanship. At the Army Equestrian School, at Weedon, England, the wooden horses were recently installed to give rookies the feel of the saddle and practice in mounting and dismounting before they tackle the *spirited* animals stabled at the school.

# Beispiel: Flugsimulator (1910)





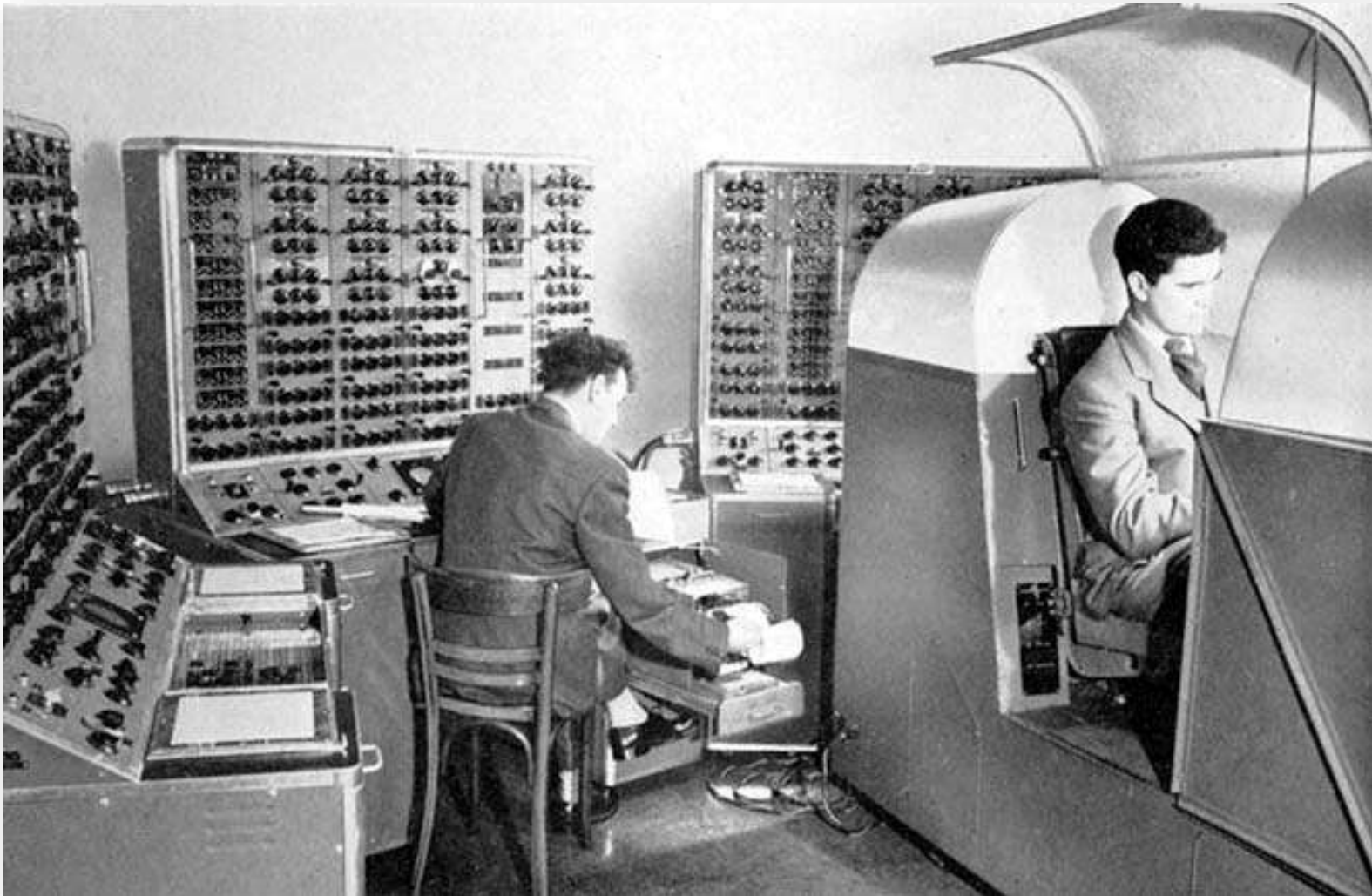
# Beispiel: Flugsimulator (1920)





# Beispiel: Flugsimulator (1950er-Jahre)

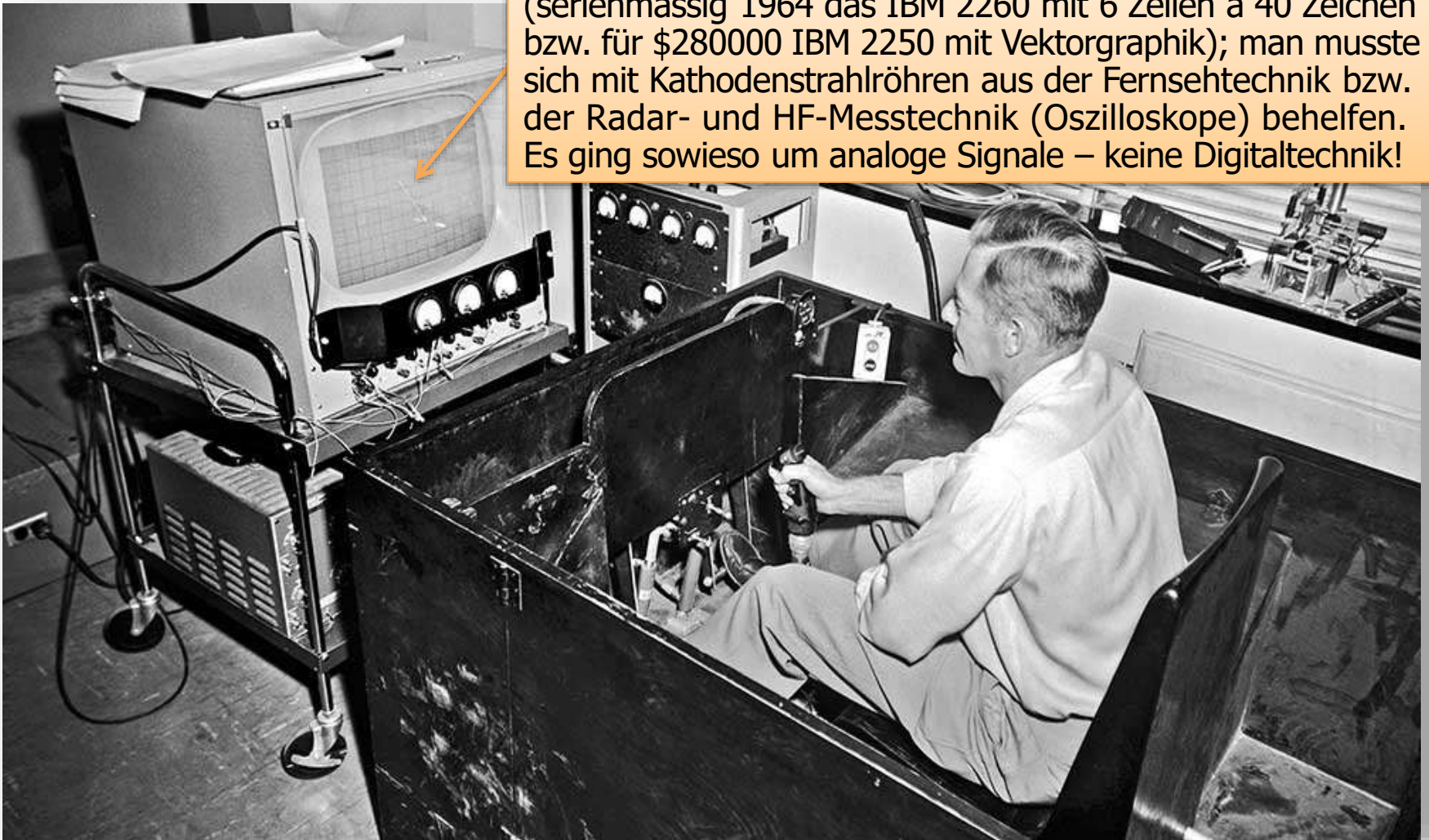
## Analogcomputer





# Beispiel: Flugsimulator (NASA, 1958)

Eigentliche **Computermonitore** gab es noch länger nicht (serienmässig 1964 das IBM 2260 mit 6 Zeilen à 40 Zeichen bzw. für \$280000 IBM 2250 mit Vektorgraphik); man musste sich mit Kathodenstrahlröhren aus der Fernsehetechnik bzw. der Radar- und HF-Messtechnik (Oszilloskope) behelfen. Es ging sowieso um analoge Signale – keine Digitaltechnik!





# Beispiel: Flugsimulator (NASA, 1968)



# Beispiel: Flugsimulator (MIT, 1988)



# Beispiel: Flugsimulator (1990er-Jahre)



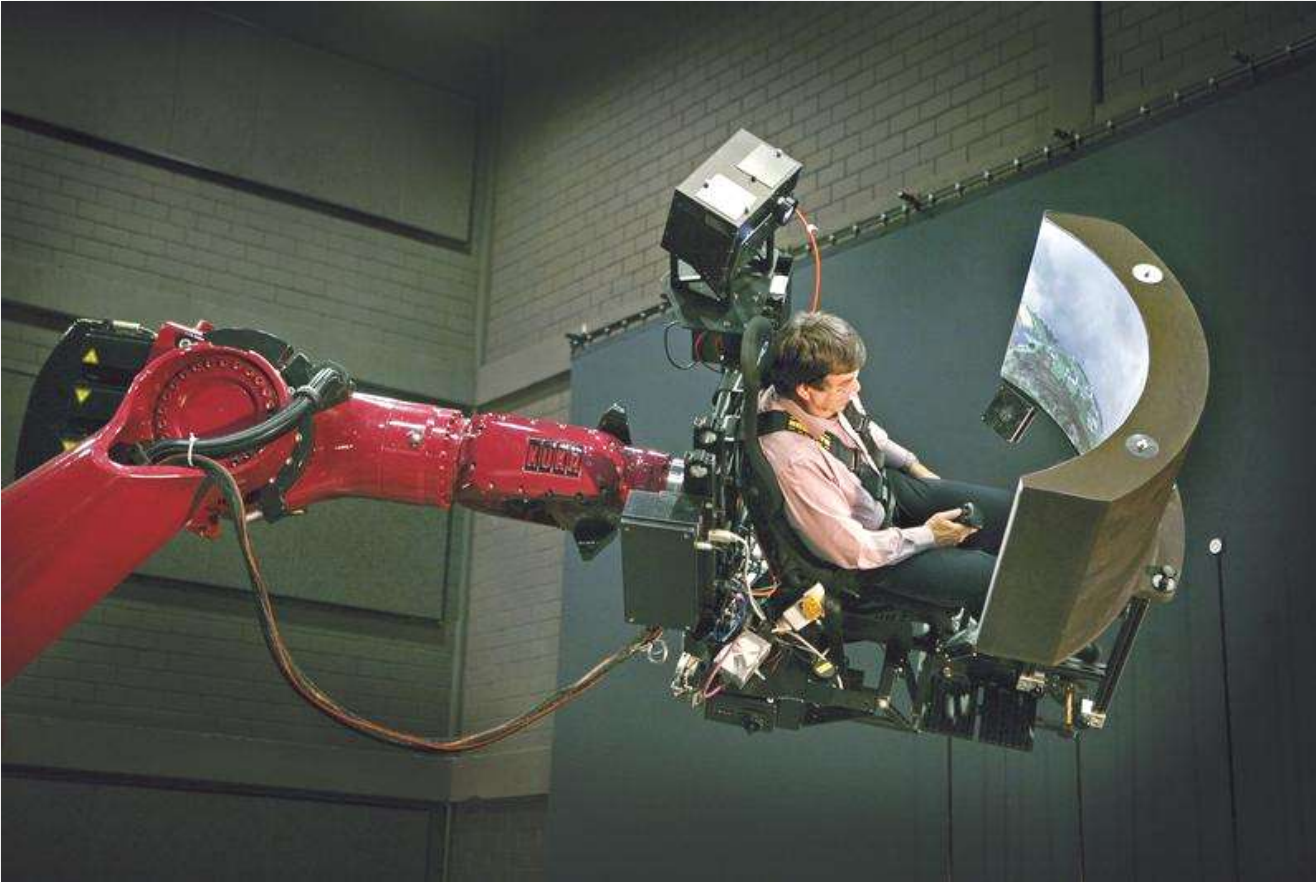
Röhrenfernseher, PC und Pilotenbrille



# Beispiel: Flugsimulator (2000er-Jahre)

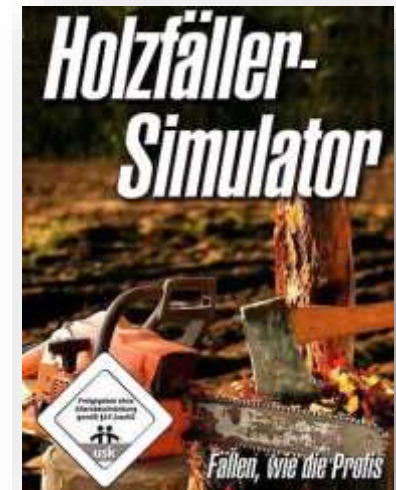
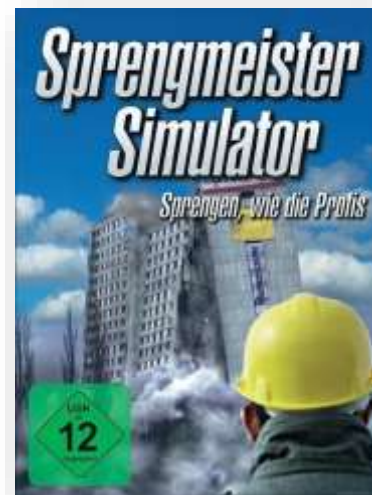
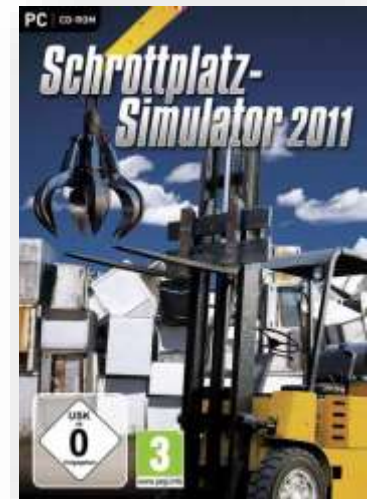
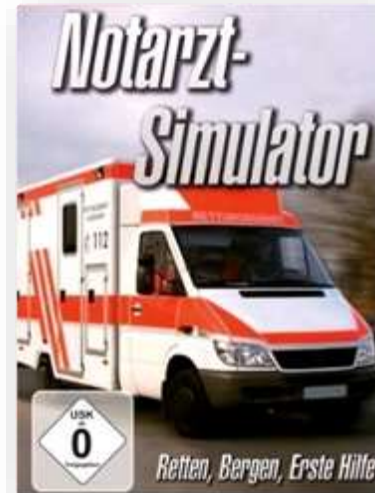
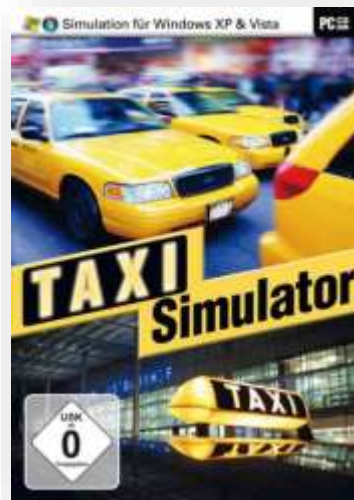
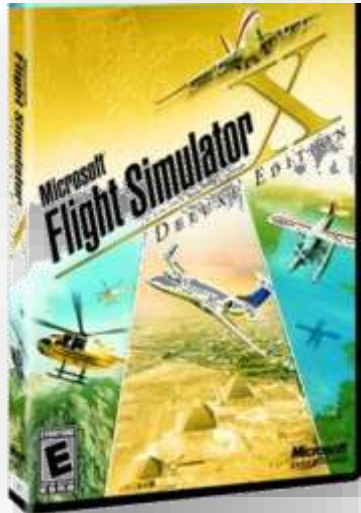


# Beispiel: Flugsimulator (2010er-Jahre)



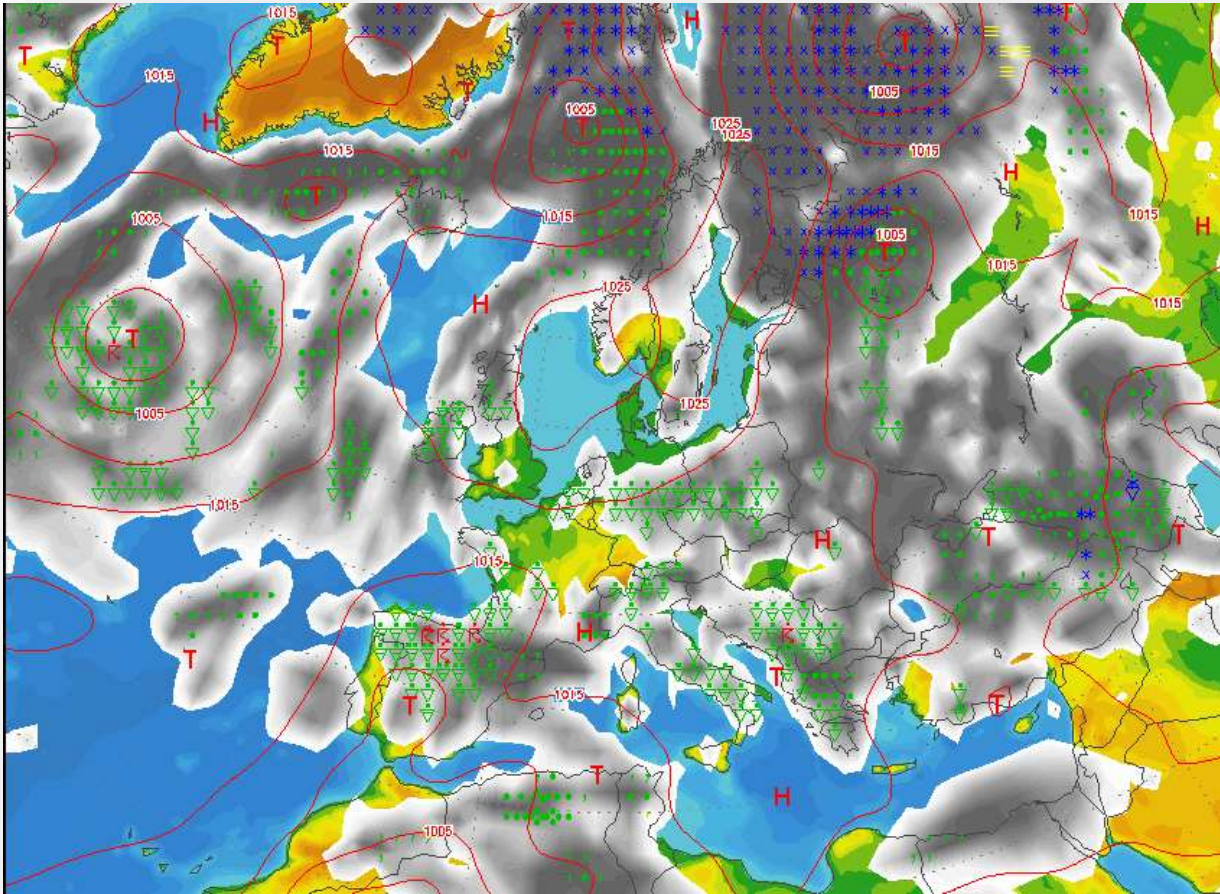
Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik

# Simulatoren für alles...



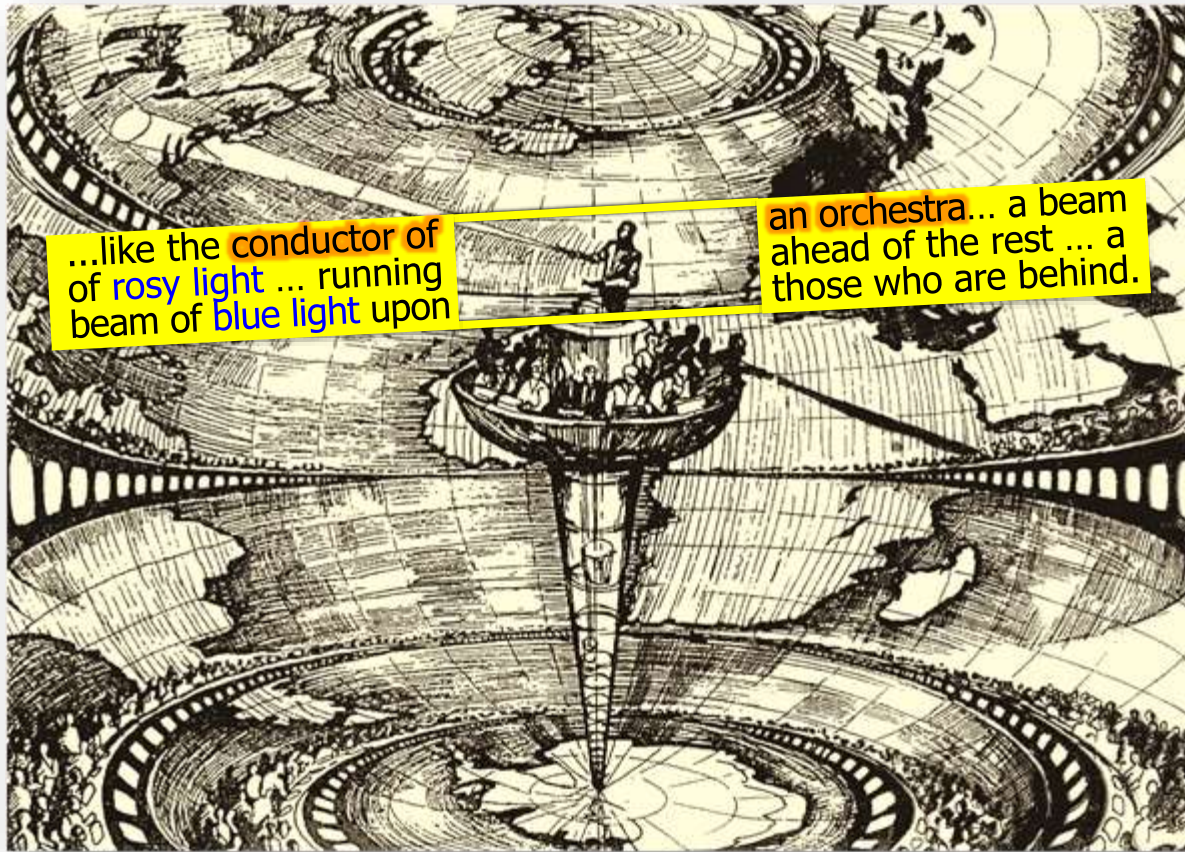


# Noch ein wichtiges Beispiel: Simulationsmodelle für die **Wetterprognose** → →



www.wetter3.de

# Historische Vision der Wettervorhersage mittels numerischer Simulation (1922)



Mehrere 10000 menschliche Rechner in einer kugelförmigen Galerie um einen Dirigenten berechnen die Wettervorhersage. Eine auf die Wände gemalte Erdkarte definiert das Rechengitter, das eine räumliche Auflösung von einem Grad hat. Die Ergebnisse der Berechnung werden in einem Eimer zu einem Telegrafen herabgelassen, der die Wetterprognose verbreitet.

Nach: **Lewis Fry Richardson (1922) Weather Prediction by Numerical Process**

Alf Lannerbäck (1929-2010), Dagens Nyheter, Stockholm



## **Peter Lynch (University College Dublin) 2007 zur Neuauflage von Richardsons Buch (Auszug):**

The basic ideas of numerical forecasting and climate modelling date from long before the first electronic computer was constructed. These techniques were first developed by Richardson about a century ago, and set down in this book. Richardson was concerned with establishing a scientific method of predicting the weather.

The first explicit analysis of the weather prediction problem from a scientific viewpoint was undertaken by the Norwegian scientist Vilhelm Bjerknes. Richardson's forecasting scheme amounts to a precise and detailed implementation of Bjerknes' programme. Richardson had developed a versatile technique for calculating approximate solutions of nonlinear partial differential equations by numerical approximation. Realizing that it could be applied to the evolution of atmospheric flows, he laid out the principles of scientific weather prediction. He constructed a systematic algorithm for generating the numerical solution of the governing equations, and he applied it to a real-life case, calculating the initial changes in pressure and wind.

Although mathematically correct, Richardson's prediction was physically unrealistic. The essence of the problem is that a delicate dynamical balance between the fields of mass and motion prevails in the atmosphere. This was absent from the initial data used by Richardson; only later did he come to understand this problem. The consequence of the imbalance was the contamination of the forecast by spurious noise. As a result, his 'forecast' was a failure. The significance of Richardson's work was not therefore immediately evident, and his book had little influence in the initial decades after its appearance. The computational complexity of the process and the disastrous results of the single trial forecast tended to deter others from following the trail mapped out by him.

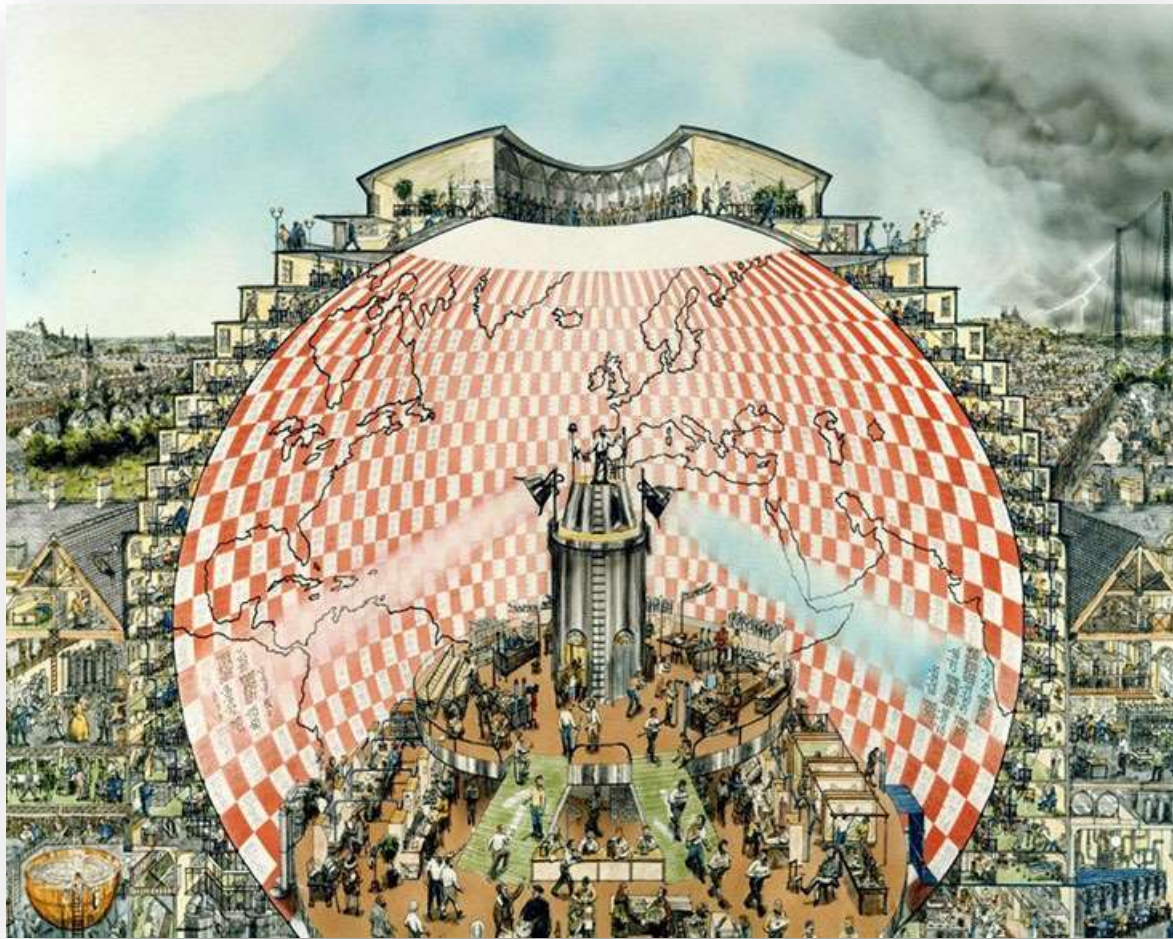
Richardson's genius was to apply mathematical methods to problems that had traditionally been regarded as beyond quantitative assault. The continuing relevance and usefulness of his work confirms the value of his ideas. The approximate methods that he developed for the solution of differential equations are extensively used today in the numerical treatment of physical problems.

Recognizing that a practical implementation of his method would involve a phenomenal amount of numerical calculation, he imagined a fantastic Forecast Factory with a huge staff of human computers busily calculating the terms in the fundamental equations and combining their results in an ingeniously organized way to produce a weather forecast. This may be the earliest example of massively parallel processing.

Richardson expressed a dream that, 'some day in the dim future', numerical weather prediction would become a practical reality. However, there were several major practical obstacles to be overcome before numerical prediction could be put into practice. A fuller understanding of atmospheric dynamics allowed the development of simplified systems of equations; regular radiosonde observations of the free atmosphere and, later, satellite data, provided the initial conditions; stable finite difference schemes were developed; and powerful electronic computers provided a practical means of carrying out the prodigious calculations required to predict the changes in the weather. While his book had little effect in the short term, his methods are at the core of atmospheric simulation and it may be reasonably claimed that his work is the basis of modern weather forecasting.



# Historische Vision der Wettervorhersage mittels numerischer Simulation (1922)



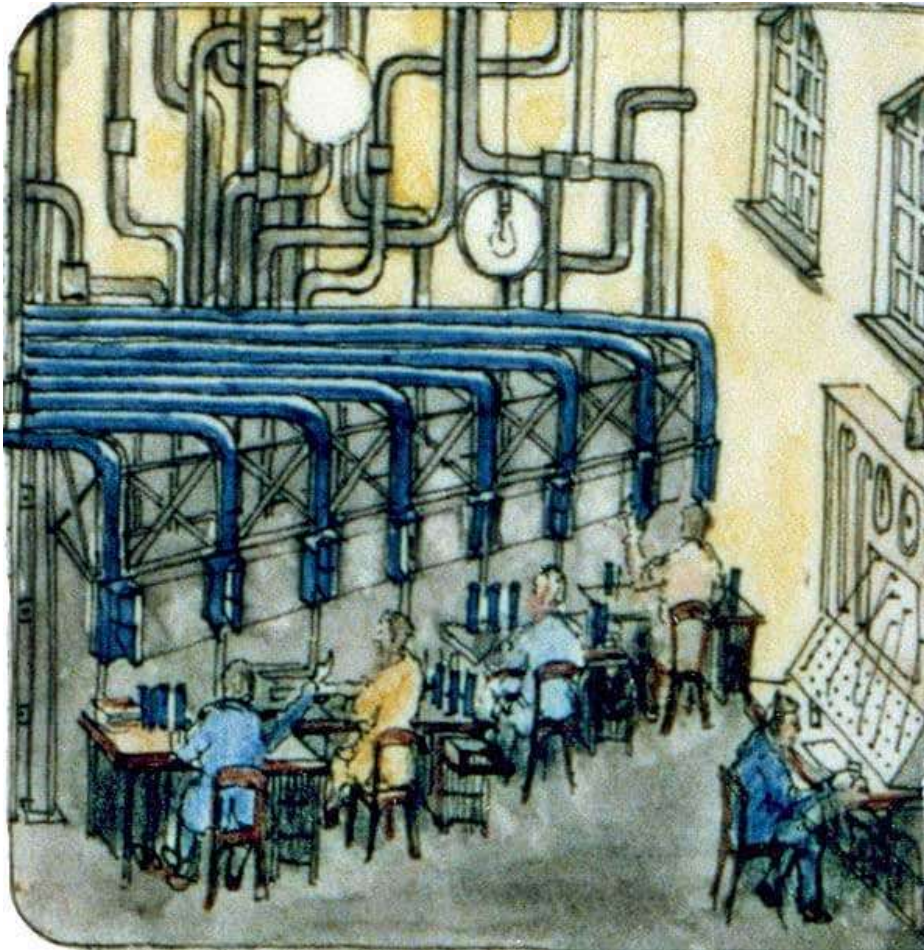
[www.emetsoc.org/resources/rff/](http://www.emetsoc.org/resources/rff/)

Leseempfehlung: „Richardson’s Fantastic Forecast Factory“ von Peter Lynch, [www.emetsoc.org/resources/rff/](http://www.emetsoc.org/resources/rff/) mit liebevoll ausgeführten Bildern im Retrotech-Stil von Stephen Conlin. („A remarkable work, rich in detail and replete with hidden gems“.) Darin treten neben Lewis Richardson u.a. auch Gottfried Wilhelm Leibniz, Ada Lovelace, Charles Babbage, George Boole und Blaise Pascal auf. (Siehe dazu auch <http://mathsci.ucd.ie/~plynch/Publications/RFFF-WX-02-NoAbs.pdf>)

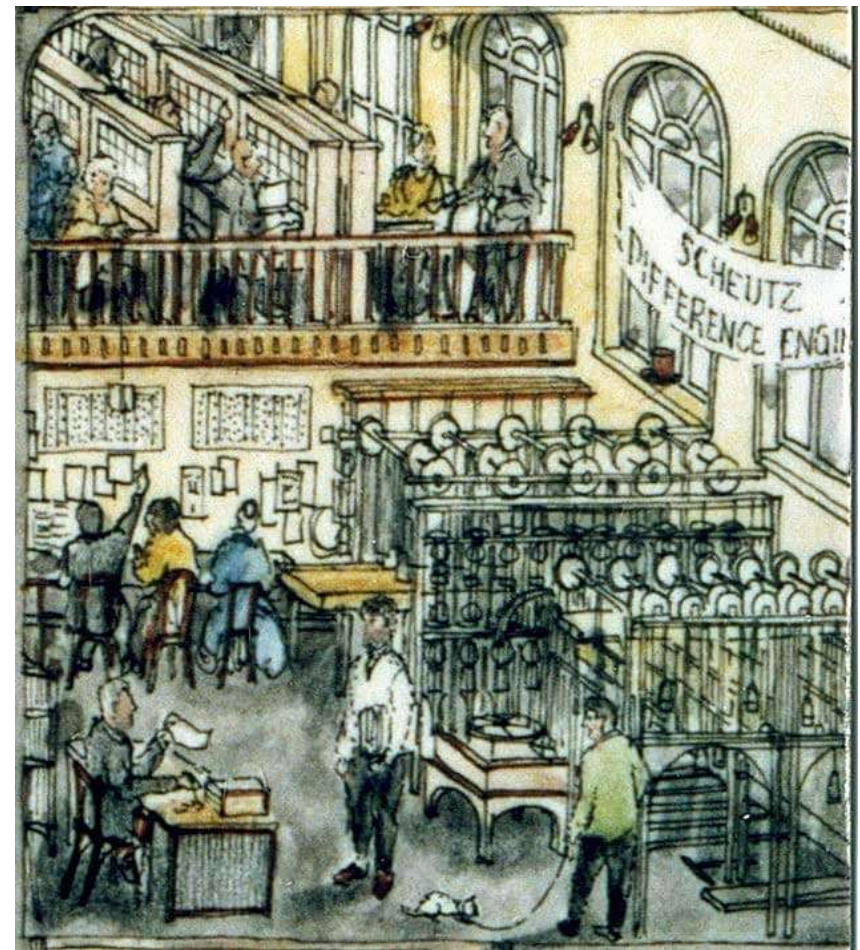
Bilddetails →



# Historische Vision der Wettervorhersage mittels numerischer Simulation (1922)



Rohrpost und Schalttafeln zur Kommunikation



(Elektro)mechanische Rechenautomaten



# L.F. Richardson 1922

## *Weather Prediction by Numerical Process*

were published for certain limits of  $h$ , the calculation of

$$M_E = \int v_E \rho \cdot dh, \quad M_N = \int v_N \rho \cdot dh$$

d. There remains the problem of gusts and local eddies of larger size discussed in Chapter 10.

ances, in which wind can be observed, are extending. Thus during the customary to observe pilot balloons at night by attaching to the balloon a small paper lantern. The wind data available at present relate mainly to observations for observing the wind above fog, or low cloud, kite-balloons can be used as a separate method of location by sound\*. For the same purpose projectiles have been used at Benson up to heights of 600 m. The projectiles have been spheres, instead of a cherry and they have been projected nearly vertically but in a direction inclined towards the wind so that the returning sphere struck earth which protected the observer.

### Temperature

of Ch. 9 sets out from the records of registering balloons. But these are used as a basis for actual forecasts because the balloon is often not found more than a few hours after its ascent.

Since the war temperature observations by aeroplanes have been taken up to about 5 kilometres. Also kite-balloons have been utilized. Observations have recently been conducted at Benson Observatory with a view to observations of observing temperature, or its equivalent, which should give information and which should be cheaper than aeroplane ascents. The results are described in publications entitled "Lizard Balloons for signalling the ratio of temperature  $\dagger$ ," "Cracker balloons for signalling temperature  $\dagger$ " and "Balloons for continuous signalling  $\dagger$ ." It is hoped also to describe some observations in which the time of flight of a projectile shot upwards served as an indication of temperature aloft.

### Water in Clouds

in the existing observational data relates to the amount of water in clouds. Attempts have been made to measure this photometrically. And it has been found possible when the cloud particles are all of one known size. But in actual practice without definite information concerning the size of the particles.

\* *Report Intern. Commiss. Upper Air*, Bergen 1921, p. 22.

† *Office, London, Professional Notes*, Nos. 18 and 19.

‡ *Soc. 1920 July*, p. 293.

§ *son, "Water in Clouds," Roy. Soc. Lond. Proc. A*, Vol. 96 (1919), p. 19.

### CH. II/2. THE SPEED AND ORGANIZATION OF COMPUTING

It took me the best part of six weeks to draw up the computing forms and to work out the new distribution in two vertical columns for the first time. My office was a heap of hay in a cold rest billet. With practice the work of an average computer might go perhaps ten times faster. If the time-step were 3 hours, then 32 individuals could just compute two points so as to keep pace with the weather, if we allow nothing for the very great gain in speed which is invariably noticed when a complicated operation is divided up into simpler parts, upon which individuals specialize. If the co-ordinate chequer were 200 km square in plan, there would be 3200 columns on the complete map of the globe. In the tropics the weather is often foreknown, so that we may say 2000 active columns. So that  $32 \times 2000 = 64,000$  computers would be needed to race the weather for the whole globe. That is a staggering figure. Per-

haps in some years' time it may be possible to report a simplification of the process. But in any case, the organization indicated is a central forecast-factory for the whole globe, or for portions extending to boundaries where the weather is steady, with individual computers specializing on the separate equations. Let us hope for their sakes that they are moved on from time to time to new operations.

After so much hard reasoning, may one play with a fantasy? Imagine a large hall like a theatre, except that the circles and galleries go right round through the space usually occupied by the stage. The walls of this chamber are painted to form a map of the globe. The ceiling represents the north polar regions, England is in the gallery, the tropics in the upper circle, Australia on the dress circle and the antarctic in the pit. A myriad computers are at work upon the weather of the part of the map where each sits, but each computer attends only to one equation or part of an equation. The work of each region is coordinated by an official of higher rank. Numerous little "night signs" display the instantaneous values so that neighbouring computers can read them.

Each number is thus displayed in three adjacent zones so as to maintain communication to the North and South on the map. From the floor of the pit a tall pillar rises to half the height of the hall. It carries a large pulpit on its top. In this sits the man in charge of the whole theatre; he is surrounded by several assistants and messengers. One of his duties is to maintain a uniform speed of progress in all parts of the globe. In this respect he is like the conductor of an orchestra in which the instruments are slide-rules and calculating machines. But instead of waving a baton he turns a beam of rosy light upon any region that is running ahead of the rest, and a beam of blue light upon those who are behindhand.

Four senior clerks in the central pulpit are collecting the future weather as fast as it is being computed, and despatching it by pneumatic carrier to a quiet room. There it will be coded and telephoned to the radio transmitting station.

Messengers carry piles of used computing forms down to a storehouse in the cellar.

In a neighbouring building there is a research department, where they invent improvements. But there is much experimenting on a small scale before any change is made in the complex routine of the computing theatre. In a basement an enthusiast



# L.F. Richardson 1922 – Forecast-factory for the whole globe


*Weather Prediction by Numerical Process*

haps in some years' time it may be possible to report a simplification of the process. But in any case, the organization indicated is a central forecast-factory for the whole globe or for portions extending to boundaries where the weather is steady, with individual computers specializing on the separate equations. Let us hope for their sakes that they are moved on from time to time to new operations.

After so much hard reasoning, may one play with a fantasy? Imagine a large hall like a theatre, except that the circles and galleries go right round through the space usually occupied by the stage. The walls of this chamber are painted to form a map of the globe. The ceiling represents the north polar regions, England is in the gallery, the tropics in the upper circle, Australia on the dress circle and the antarctic in the pit. A myriad computers are at work upon the weather of the part of the map where each sits, but each computer attends only to one equation or part of an equation. The work of each region is coordinated by an official of higher rank. Numerous little "night signs" display the instantaneous values so that neighbouring computers can read them.

Lewis Fry Richardson (1881 – 1953) war britischer Meteorologe, Physiker und Chemiker. Ab 1915 entwickelte er seine Ideen zur numerischen Wettervorhersage. Als überzeugter Quäker und Pazifist engagierte er sich ab den 1920er-Jahren stark in der Friedensbewegung. 1940 kündigte er seine Stelle, um sich – nur von seinen Ersparnissen lebend – vollständig der Friedensforschung zu widmen.

# „Computer“ war eine Berufsbezeichnung



COMPUTING  
DIVISION  
COMPUTING  
SECTION

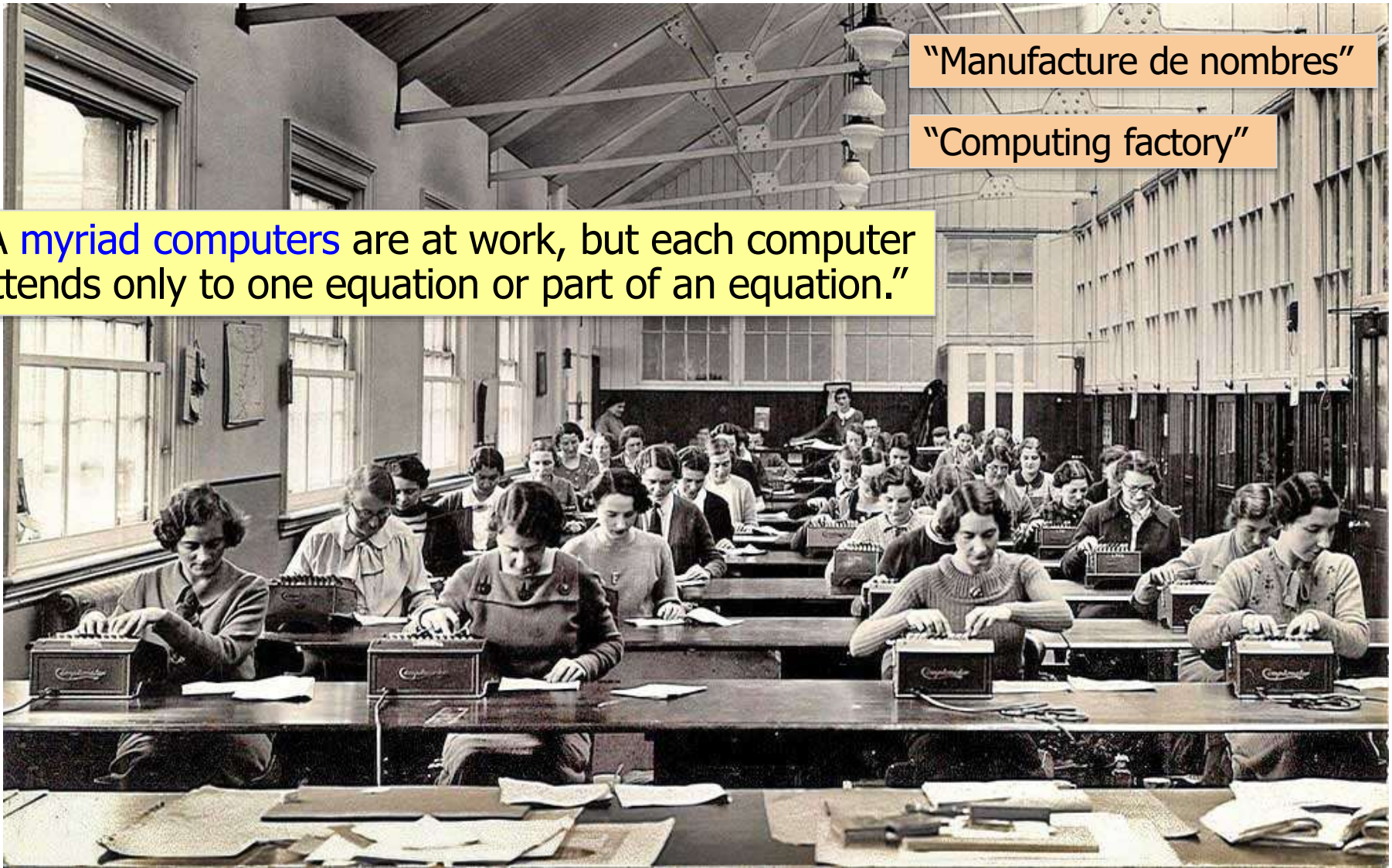


# Als „Computer“ noch Menschen waren...

“Manufacture de nombres”

“Computing factory”

“A myriad computers are at work, but each computer attends only to one equation or part of an equation.”





# Als „Computer“ noch Menschen waren...

State Library of South Australia [B 21444], <https://slsa-collections.s3.amazonaws.com/d9/05/96b3-4495-55da-b245-d254368b80e7.jpg>



„Comptometristen“ (so genannt nach der „Comptometer“-Rechenmaschine) des Australian Women's Army Service im zweiten Weltkrieg; im Hintergrund Teile der Uniformausrüstung mit Stahlhelmen.

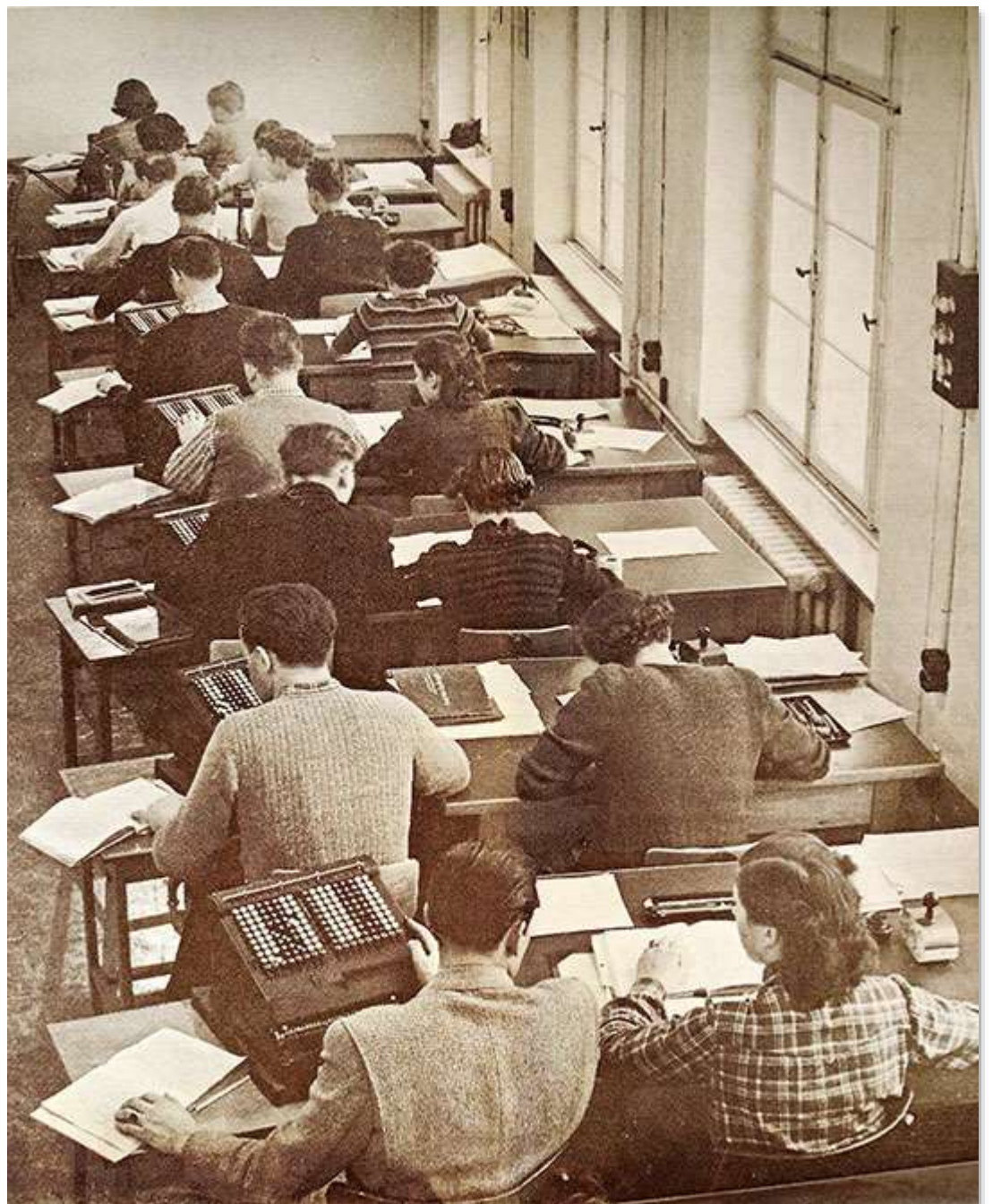
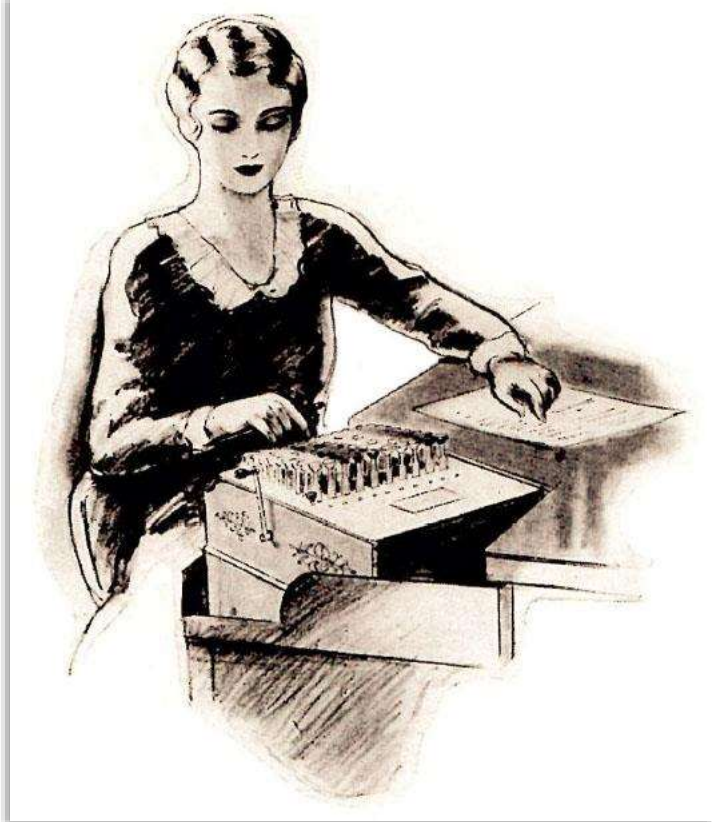
# Als „Computer“ noch Menschen waren...



Adding up figures, processing invoices and acting as a corporate version of a cash register --- young women would have been given this kind of clerical work. The noise in the place was phenomenal, the clickity clack of those machines was incredible. The job required enormous concentration and wasn't well paid. For these women, such jobs filled in time between finishing school and getting married or starting a family. [www.heraldsun.com.au]









# Als „Computer“ noch Menschen waren...



# Als „Computer“ noch Menschen waren...

*In der wissenschaftlichen Welt waren menschliche „Computer“ seit Jahrhunderten beschäftigt worden, um mit der Hand Tafeln mathematischer Funktionswerte zu berechnen. Babbage hatte in der Tat seine Difference Engine gebaut, um diese Art rechnender Arbeit zu automatisieren. Bereits 1773 wurde Mary Edwards, ein weiblicher „Computer“, von der britischen Regierung beauftragt, astronomische Tafeln für das nautische Jahrbuch zu berechnen. Während der Depression der 1930er nahm die US-Regierung ein Grossprojekt über mathematische Tafeln in Angriff, um arbeitslosen Wissenschaftlern*





# Als „Computer“ noch Menschen waren...



*dadurch Arbeit zu verschaffen. Die technische Leitung des Projektes hatte die Mathematikerin Gertrude Blanch, welche die Gruppe auch noch während des Zweiten Weltkriegs leitete, da sie verschiedene Kriegsprojekte rechnerisch unterstützte. Die militärischen Dienststellen hatten ihre eigenen Mitarbeiterinnen. Das ballistische Forschungslabor der US-Armee beschäftigte beispielsweise zweihundert weibliche „Computer“. Diese „Computer“ verwendeten häufig zur Unterstützung ihrer Arbeit mechanische Tischrechenmaschinen.*

Text aus: Janet Abbate: Interpreten der Datenverarbeitung – Frauen im 2. Weltkrieg und die frühe Computerindustrie, 2015





# Als „Computer“ noch Menschen waren...



„Computer“ bei der [NASA](#) (Jet Propulsion Lab, Pasadena) Mitte der 1950er-Jahre:  
*Using simple pencil and paper — along with breadbox-sized adding machines for basic arithmetic — about 30 women hand-plotted calculations for all of JPL's launches and encounters.*

# Als „Computer“ noch Menschen waren...



Jack Lemmon als „human computer“ in der Rolle des Versicherungsangestellten C.C. Baxter im Film „[The Apartment](#)“ von Billy Wilder (fünf Oskars, mit [Shirley MaLaine](#)) von 1960. Für die Szenen in dem riesigen Grossraumbüro wurden die hinteren Reihen mit kleinwüchsigen Schauspielern besetzt. Die elektro-

mechanische Rechenmaschine ist eine „Friden STW-10“ (Lemmon berechnet hier angeblich 355/133). Nicht realitätsgetreu ist die Aufstellung der Maschinen auf der rechten Pultseite; man nutze sie i.Allg. mit der linken Hand. („*La main droite restant libre – aucune fatigue pour l'opérateur qui peut inscrire les résultats obtenus*“)





# Jack Lemmon (& Shirley MacLaine): "The Apartment" (Billy Wilder, 1960)



Video-Ausschnitt: Büro-Szene am Anfang des Films



# Jack Lemmon (& Shirley MacLaine): "The Apartment" (Billy Wilder, 1960)

Video Teil 2

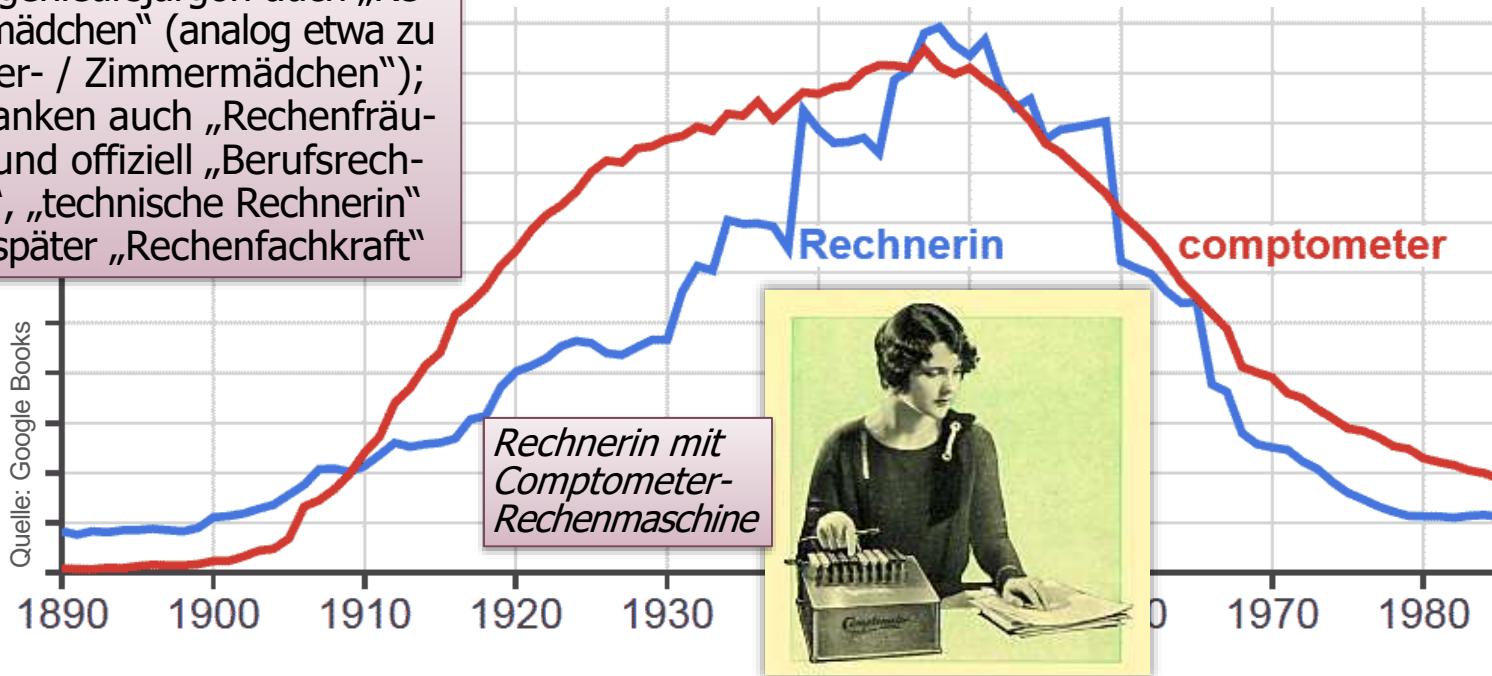


I actually worked with one of these machines back in 1963 in my very first office job. I was trained only to do addition. But after completing a routine addition job, I was curious to see what entering dividend and divisor and pressing the two division buttons would do. I pressed the two division buttons and the monstrous machine burst into life. The rear carriage hit the right hand cabinet first and made a terrible sound. Then the rear carriage careened leftwards and smashed into the left hand cabinet, again groaning like a dinosaur taken down by an elephant gun. The rear carriage centralized and just kept on groaning terribly. All you could hear was the internal clink clink of cogs and wheels as they dropped out of position and onto the floor of the machine. -- Robin Bennett

„Rechner“ als männliches Pendant eher selten

# „Rechnerin“ war die deutsche Berufsbezeichnung

Im Ingenieursjargon auch „Rechenmädchen“ (analog etwa zu „Kinder- / Zimmermädchen“); bei Banken auch „Rechenfräulein“ und offiziell „Berufsrechnerin“, „technische Rechnerin“ oder später „Rechenfachkraft“



„Wissenschaftliche Rechnerinnen“ gab es z.B. an astronomischen oder mathematischen Universitätsinstituten; ab Mitte der 1960er-Jahre abgelöst durch „Mathematisch-Technische Assistentinnen“, die seinerzeit Wissenschaftler bei der Nutzung von Grossrechnern unterstützten.

Als die elektronischen Rechenautomaten aufkamen, kam es, zunächst in den USA, zu einer Verschiebung der Bedeutung: Im Februar 1945 schrieb z.B. der Computerpionier George Stibitz von den Bell Labs in einem Bericht über Relay-Computer für das National Defense Research Committee: „Human agents will be referred to as **operators** to distinguish them from **computers** (machines).“

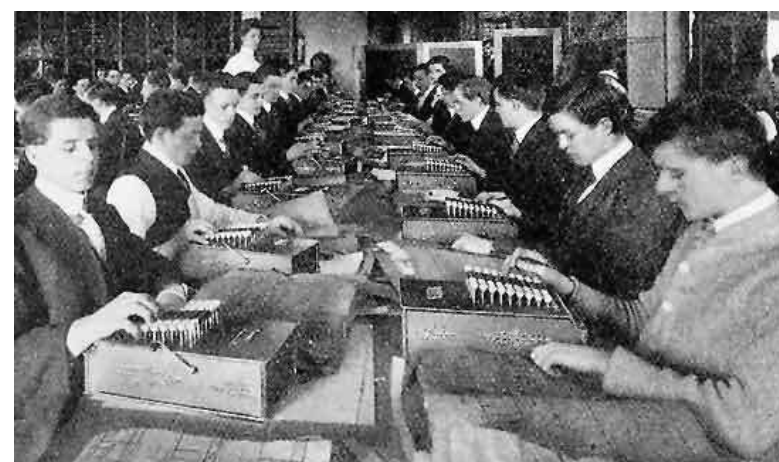




Externer Elektromotor

Handkurbel

Eine typische Rechenmaschine eines „Computers“





# Comptometer – Klassiker der Büro- bzw. Tischrechenmaschinen



www.rechenmaschinen-illustrated.com

- **Comptometer** (ab 1885): Erste mechanische Rechenmaschine, die ausschliesslich durch das Drücken von Tasten (sowie das Drehen an einer Kurbel) bedient wurde. Jede Dezimalstelle hatte eine Reihe von Tasten mit den Werten von 1 – 9. Durch gleichzeitige Zifferneingabe konnten die Zahlen im Vergleich zu heutigen Taschenrechnern viel schneller eingetastet werden.
- Comptometer waren i.W. **Additionsmaschinen**; die Subtraktion konnte durch die 9er-Komplementmethode erzielt werden (Zifferntasten waren dazu in Miniaturschrift mit dem 9er-Komplement markiert).
- Im Laufe der Zeit gab es div. Modelle; im Bild: **Modell ST** ( $\geq 1930$ ).

# Diverse Comptometer-Modelle im Zeitverlauf





# Rechenmaschinen für „Computer“

Neben dem Comptometer stellten mehrere andere Firmen im 20. Jh. ebenfalls mechanische (bzw. später elektromechanische) Rechenmaschinen her.



R.C. Allen (links) und Monroe (oben). Die R.C. Allen Inc. wurde 1932 in Grand Rapids, Michigan, gegründet; die Monroe Calculating Machine Company 1912 in Newark, New Jersey.



## Rechenmaschinen für „Computer“ (2)



Im Bild: Das letzte Modell („PEM 15“, 1960) der Serie der (elektro)mechanischen „Archimedes“-Rechenmaschinen, die ab 1904 in Glashütte (Erzgebirge, südlich von Dresden) gefertigt wurden und auf dem [Staffelwalzenprinzip von Leibniz](#) beruhten. Zuvor, im 19. Jh., wurden dort zunächst Präzisionsuhren und andere feinmechanische Geräte hergestellt. Eine schwierige Periode machte die „Glashütter Rechenmaschinen-Fabrik Archimedes“ nach dem zweiten Weltkrieg durch, da



# Rechenmaschinen für „Computer“ (3)

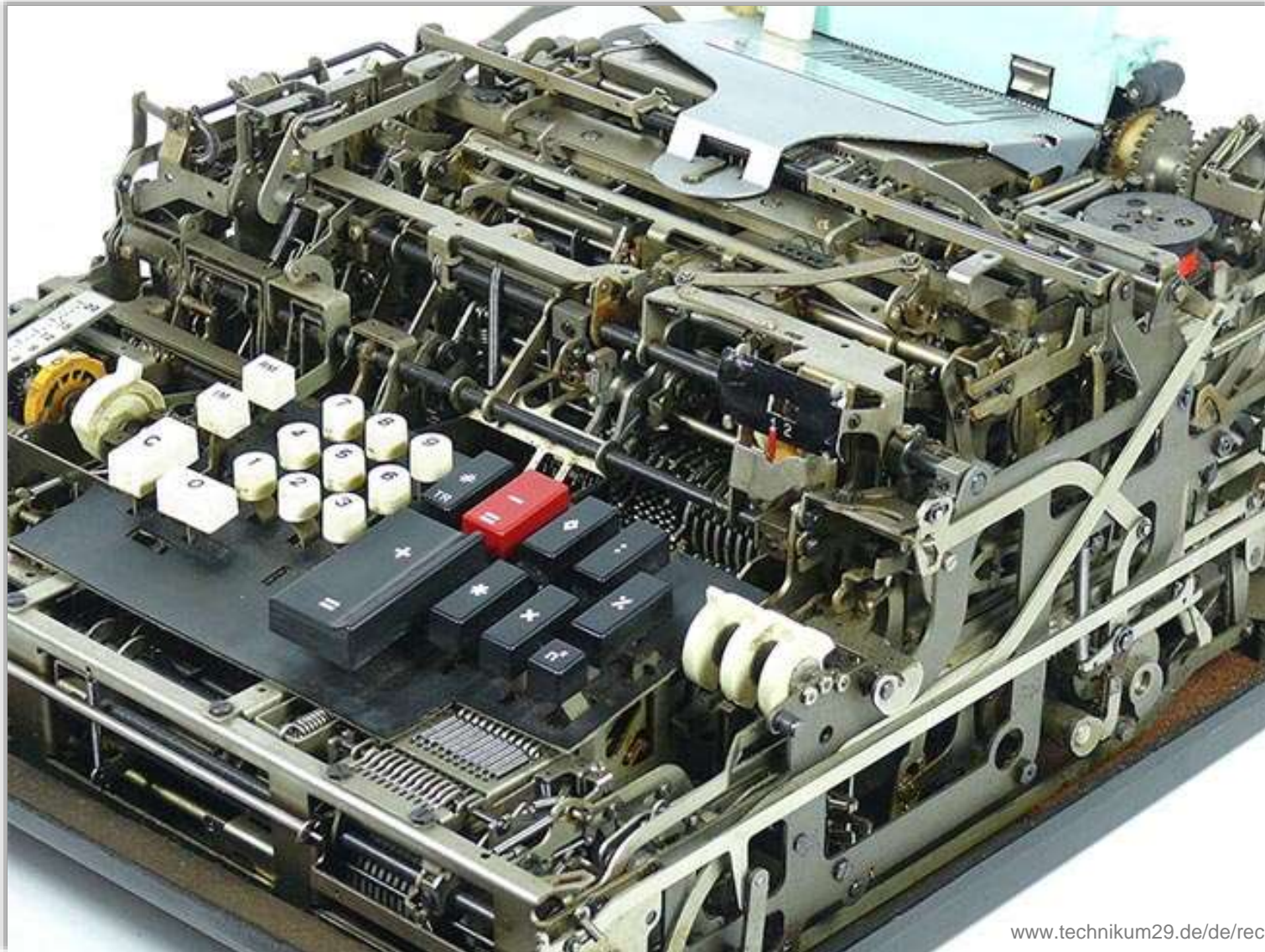
sie auf Anordnung der sowjetischen Besatzungsmacht 1945 demontiert wurde und erst Anfang der 1950er-Jahre nach Konstitution der DDR als „VEB Archimedes Rechenmaschinenfabrik Glas-hütte/Sachsen“ unter Enteignung der Besitzer neu gegründet wurde.

Bis in die 1920er-Jahre hinein erfolgte der Antrieb von Rechenmaschinen rein mechanisch mit einer Handkurbel, erst dann wurden dafür auch Elektromotoren verwendet – solche elektromechanischen Geräte wurden generell als „[Rechenautomaten](#)“ bezeichnet. (Die PEM 15 war ein „Schnellautomat“, da der antreibende Motor 500 U/min leistete.) Wenn auch Multiplikation und Division ohne zusätzliche manuelle Vorgänge, quasi auf Knopfdruck, erfolgten, bezeichnete man sie als „[Vollautomaten](#)“; diese waren die Vorläufer der [elektronischen Tischrechner](#) (ab den 1960er-Jahren; mit Elektronenröhren und später Transistoren) sowie der [elektronischen Taschenrechner](#) (ab den 1970er-Jahren; basierend auf integrierten Schaltkreisen).





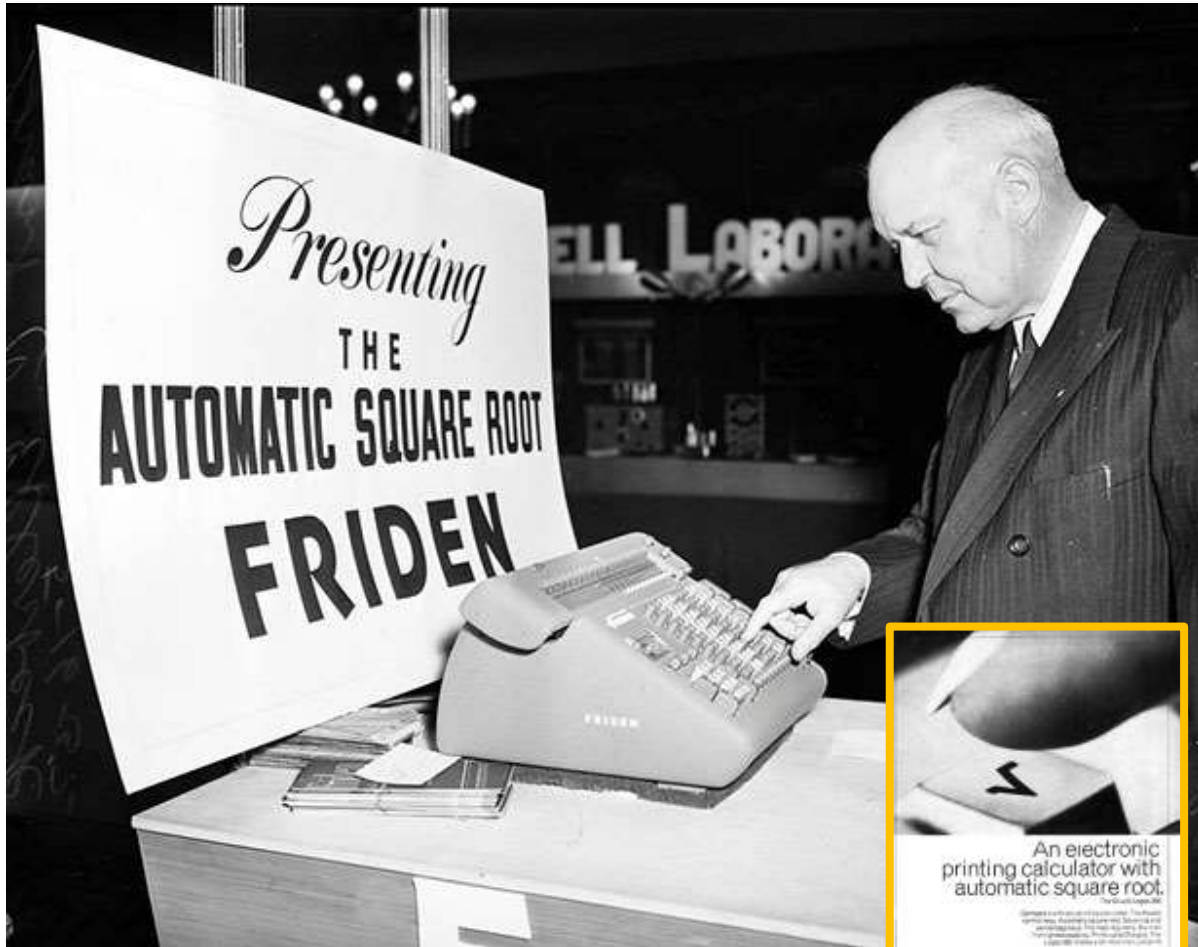
# Rechenmaschinen für „Computer“ (4)



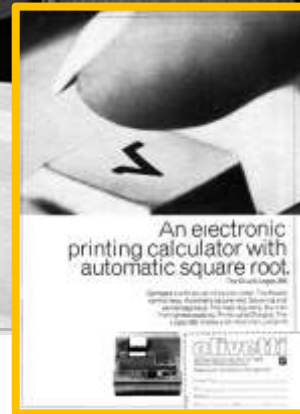
Ein Blick in das Innere der elektromechanischen Olivetti „Logos 27-2“, die 27 kg wog und 1967 auf den Markt kam. Ihre Komplexität machte sie fehleranfällig, und gegen die aufkommenden elektronischen Tischrechner hatte sie kaum eine Chance auf dem Markt.



# Rechenmaschinen für „Computer“ (5)



Einen Höhepunkt der elektromechanischen Rechenmaschinen für technisch-wissenschaftliche Anwendungen stellte die 19 kg schwere Friden SRW dar, die zusätzlich zu den 4 Grundrechenarten auch „with the touch of one key“ **Quadratwurzeln** berechnen konnte. (Im Prinzip wurden dafür so lange automatisch nacheinander Glieder der Zahlenfolge 1, 3, 5, 7, 9, 11,... vom Radikanden subtrahiert, bis ein Wert  $\leq 0$  herauskam; mit trickreichen Optimierungen konnte erreicht werden, dass für 10-stellige Zahlen nur 9 Sekunden nötig waren.) Die Maschine wurde von **1952** bis Mitte der 1960er-Jahre produziert (erst dann erschienen **elektronische** Tischrechenmaschinen mit Wurzelfunktion) und kostete seinerzeit in Deutschland ca. 8000 DM, 2 Mal mehr als ein VW.



Mai **1952**: **Friden SRW** mit Konstrukteur Grant Clawson Ellerbeck (1897 – 1970), der ab 1940 bei Friden tätig war.

Kleines Bild: Werbung für die Wurzelfunktion bei der **Logos 328, Olivetti**s erster elektronischer Tischrechenmaschine. Ab **1968** produziert, 22 kg schwer, damals £695 teuer (entspricht 2019 ca. 12 000 Euro), war sie kein Erfolg.

# “Instantaneous mathematics” durch Elektronik

The totally new  
Friden  
130 Electronic  
Calculator

Les années 1960,  
âge d'or de la pro-  
duction de porte-  
clefs publicitaires

Das Modell 132 hat-  
te hier eine weitere  
Taste zur Berechnung  
der Quadratwurzel



Mitte der 1960er-Jahre kamen die ersten **elektronischen** Tischrechner auf den Markt; diese hatten praktisch keine mechanisch bewegten Teile mehr. Einer der ersten, der Friden 130, kostete ca. 2000 Dollar. Er wurde mit „**instantaneous mathematics**“ und zeitgemäss – die Mondlandung wurde Ende des Jahrzehnts erwartet – mit „**mathematics for the space age**“ beworben. Die angepriesenen Neuerungen lassen erahnen, welche Schwächen die früheren (elektro)mechanischen Rechenmaschinen hatten:

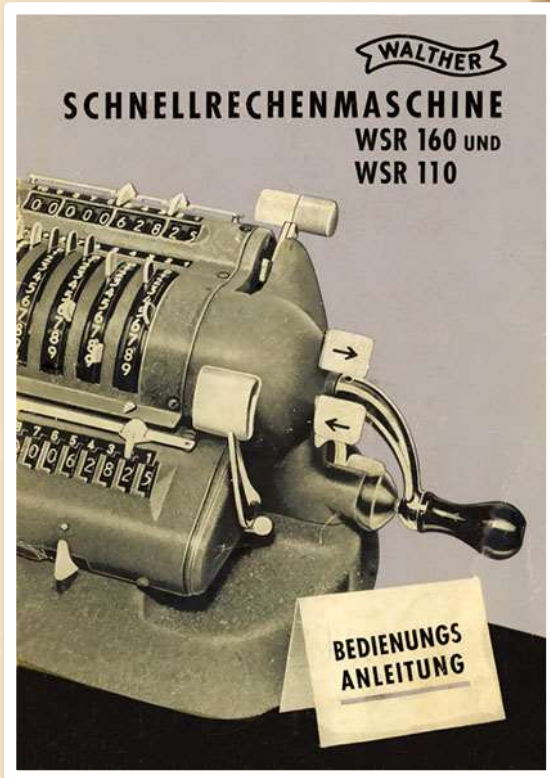
*It has **no moving parts**. Just an “eleven-key” keyboard. A **cathode ray tube** – like a miniature TV screen – displays the contents of its four registers. It’s so **silent**, a whole battery of them working in a library wouldn’t raise an eyebrow. It’s so flexible that it revolutionizes calculations in any type of business, commercial, financial, engineering or scientific enterprises. Operating time is in **milliseconds**. For the majority of problems, the 130 provides instantaneous mathematics – it gives you the answer almost before you can remove your finger from a control key. **Anyone can learn to use it in a few minutes**.*

Mit „eleven-key“ ist eine wichtige Innovation gemeint: Das **Dezimalkomma** konnte nun eingegeben werden.



# Anzeigen von 1937 (Monroe) und 1958 (WSR) – applied to every figure job

*Monroe ease and economy can be applied  
to every figure job*



<http://i.ebayimg.com/images/g/plwAAOSwa39UzSvX/s-l1600.jpg>



# Werbung: Portable und denkende Maschinen

# Burrough's Portable

14 Tage  
kostenlos  
zur Probe

Fr.  
775

Die schreibende  
**Additions-  
Maschine**



**BRIGNONI A.G.** ZÜRICH  
Bern / Basel / Genf / Lausanne / St. Gallen / Luzern  
Schaffhausen / Lugano / Neuenburg / Chur / Solothurn

MAX. GR. ANG. S.O. ZÜRICH

## So leicht wie das ABC wird die Rechenarbeit in Finanz, Handel, Industrie und Verwaltung

Automatisch und kommagenau führt sie Ihre Rechenarbeiten aus. — Geben Sie der FRIDEN Ihre heikelste, verwickelteste Rechenarbeit auf und schauen Sie zu, wie sie sich das richtige Ergebnis «ausdenkt». Die FRIDEN führt Ihre Rechenprobleme mit weniger Manipulationen aus als andere Rechenmaschinen. Sie ist so automatisiert, daß kein Extra-Training notwendig ist, um mit ihr zu arbeiten.



## FRIDEN

die <denkende> Maschine der Geschäftswelt

**Jedes Unternehmen wird sofort leistungsfähiger**, wenn FRIDEN die Arbeit übernimmt. Verlangen Sie schriftlich oder telefonisch eine überzeugende FRIDEN-Demonstration, die Ihnen beweist, wie in Ihrem Betrieb Arbeit und Zeit gespart werden können.

## Cäsar Muggli

Lintheschergasse 15 ZÜRICH Tel. (051) 25 10 62

# Werbung für (elektro-)mechanische Rechenmaschinen im „space age“



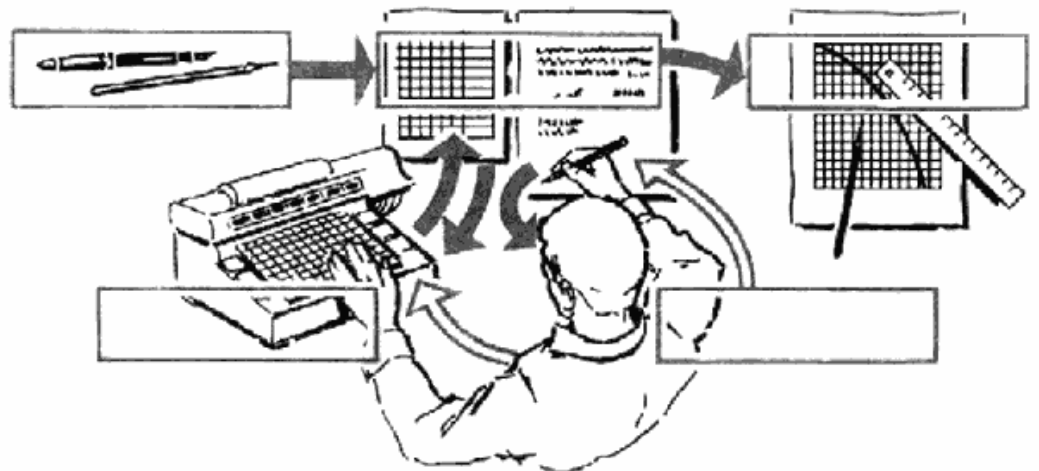
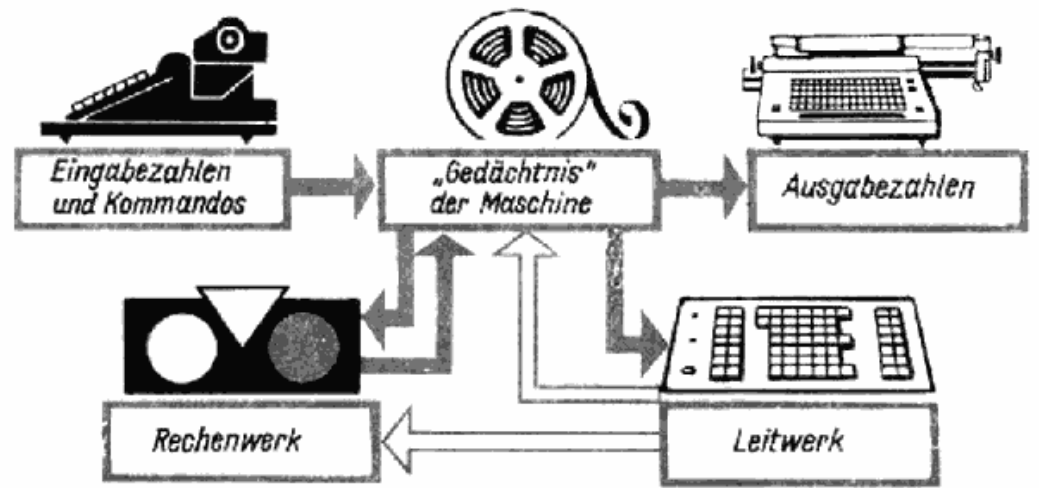
Noch bevor in den 1960er-Jahren elektronische Tischrechenmaschinen (und in den 1970er-Jahren dann Taschenrechner) aufkamen, und lange, bevor von Terminals aus interaktiv auf Computer zugegriffen werden konnte oder (in den 1980er-Jahren) Arbeitsplatzrechner („Workstations“) und PCs aufkamen, wurden elektromechanische Rechenmaschinen, die nur die arithmetischen Grundoperationen beherrschten, als **automatisierte Rechenhilfsmittel** nicht nur für kommerzielle, sondern auch für **wissenschaftliche und militärische Anwendungen** angepriesen.

# Automat: Von der Zweiheit zur Einheit

Um in der Anfangszeit der automatischen Rechenanlagen deren Funktionsweise zu erläutern, wurde oft auf das seinerzeit bekannte Schema eines rechnenden Menschen als Vergleich zurückgegriffen.

Alwin Walther, Professor für Mathematik an der Technischen Hochschule Darmstadt, schrieb bspw. 1956 in einem Aufsatz „Moderne Rechenanlagen als Muster und als Kernstück einer vollautomatisierten Fabrik“:

„Ein Rechenautomat zieht die aus einer gewöhnlichen Büro-Rechenmaschine und der sie bedienenden menschlichen Rechnerin bestehende **Zweiheit** zu einer **Einheit** zusammen.“

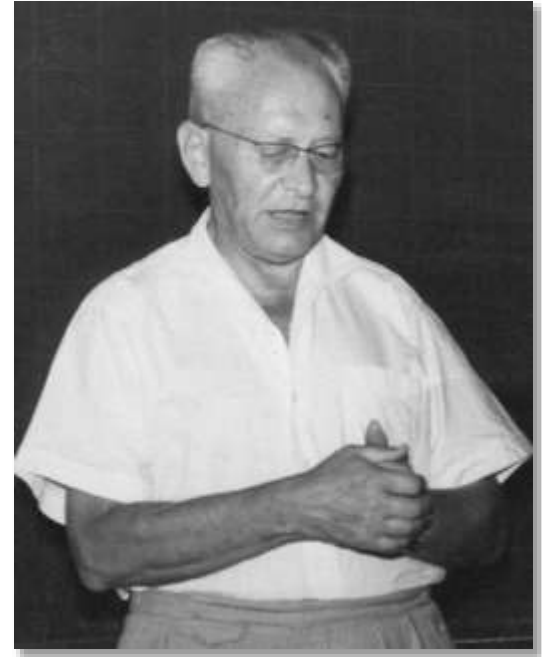




# Historische Notiz: Alwin Walther (1898–1967)

Alwin Walther studierte Mathematik und Physik an der TH Dresden und promovierte 1922 in Göttingen bei Richard Courant. 1928 wurde er als Professor für Mathematik an die TH Darmstadt berufen, wo er das Institut für Praktische Mathematik aufbaute. Er richtete ein Praktikum ein, bei dem Studenten mit mathematischen Instrumenten und mechanischen Rechenmaschinen mathematisch-technische Probleme bearbeiten und numerisch auswerten konnten. Mit der Zeit entstand ein umfangreiches Rechenlabor, in dem auch externe Rechenaufträge bearbeitet wurden und in dem bis zu 70 Rechnerinnen an Bürorechenmaschinen die von Walther vorprogrammierten Lösungsalgorithmen abarbeiteten. Während des zweiten Weltkriegs stehen Alwin Walther und sein Institut im Dienste des Militärs (u.a. Berechnungen von Raketenflugbahnen für die Heeresversuchsanstalt in Peenemünde, deren technischer Direktor der Raketenpionier Wernher von Braun war).

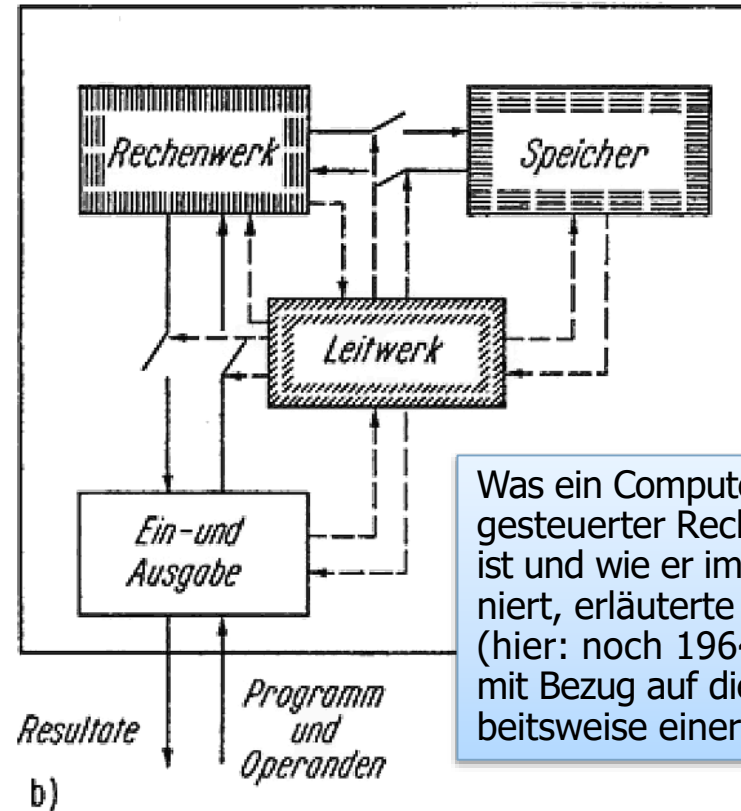
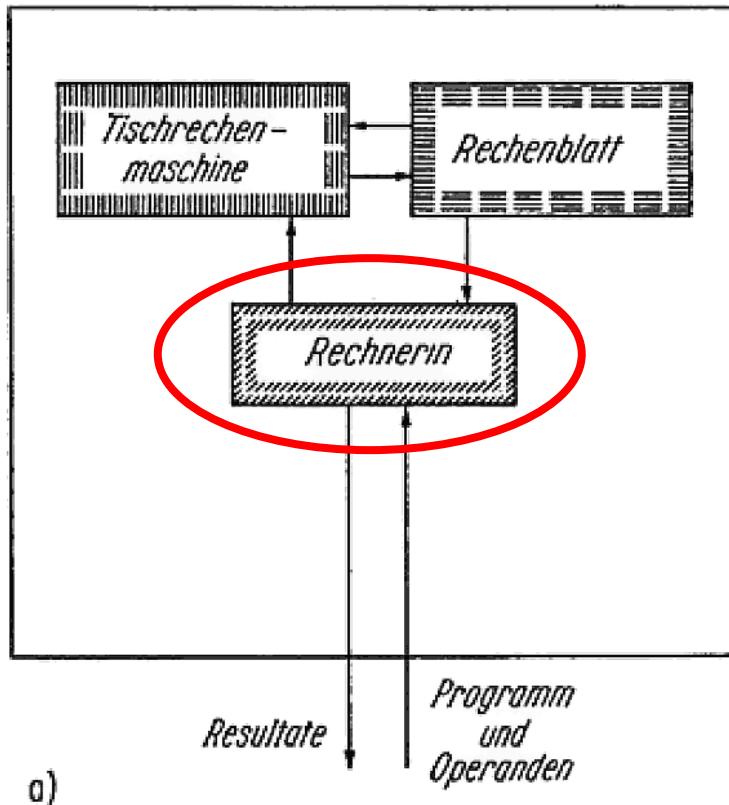
Unter Walthers Leitung wurde ab 1951 der DERA (Darmstädter Elektronischer Rechenautomat) gebaut, ein raumgrosser Elektronenrechner mit Radoröhren. In ausgedehnter Vortrags- und Publikationstätigkeit propagiert er den allgemeinen Nutzen von Computern für Wissenschaft, Technik und Wirtschaft; er war auch eine treibende Kraft bei der Errichtung des ersten Rechenzentrums Deutschlands (DRZ in Darmstadt), das unabhängig von einer Hochschule errichtet wurde. (Zur Eröffnung des DRZ im Juni 1963 schrieb die Frankfurter Rundschau in weiser Voraussicht: „Wahrscheinlich wird die Bedeutung der Kybernetik auf die Dauer nicht im Vorhandensein solcher großen Zentren liegen, sondern darin, dass viele kleine Rechenautomaten zu den verschiedensten Zwecken zur Verfügung stehen.“)



*„Walther, Altmeister der Praktischen Mathematik und des Wissenschaftlichen Rechnens, ist einer der allerersten Pioniere, die das Zeitalter der maschinellen Rechentechnik wissenschaftlich und praktisch mit vorbereitet haben. In seinem weltbekannten Institut an der Technischen Hochschule Darmstadt hat er bereits Ende der dreißiger Jahre eine Rechenstation aufgebaut, die schon hinsichtlich ihrer Kapazität seinerzeit im europäischen Raum wohl einmalig gewesen ist. In ihr wurden – zwei Jahrzehnte vor Erfindung der Programmiersprachen – umfangreiche numerische Lösungsalgorithmen erprobt und bei der Bearbeitung realer wissenschaftlich-technischer Probleme aus der Industrie erfolgreich eingesetzt.“*

Klaus Biener in: RZ-Mitteilungen Nr. 18, August 1999, Humboldt-Universität Berlin.

# „Gegenüberstellung von Rechnerin und Automat“



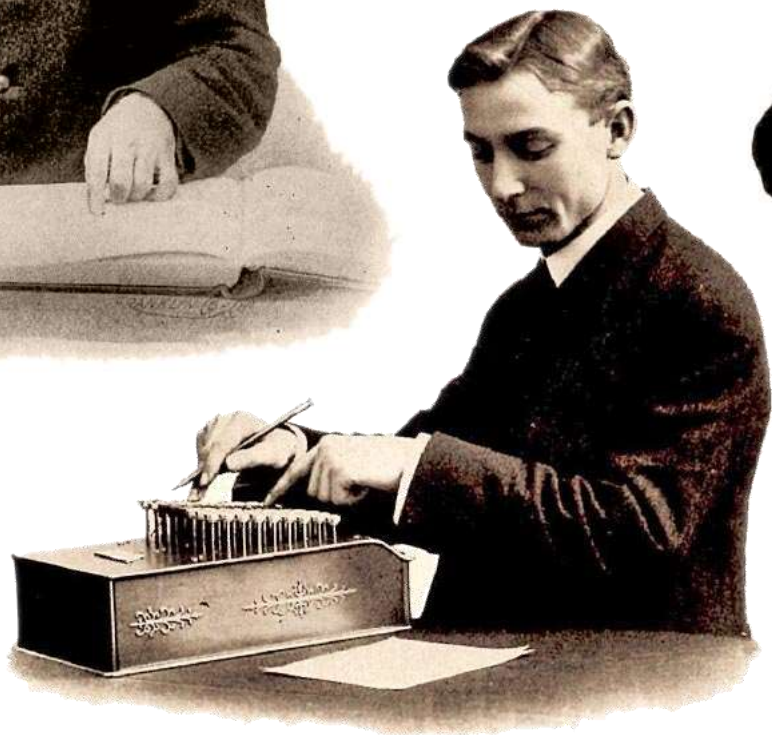
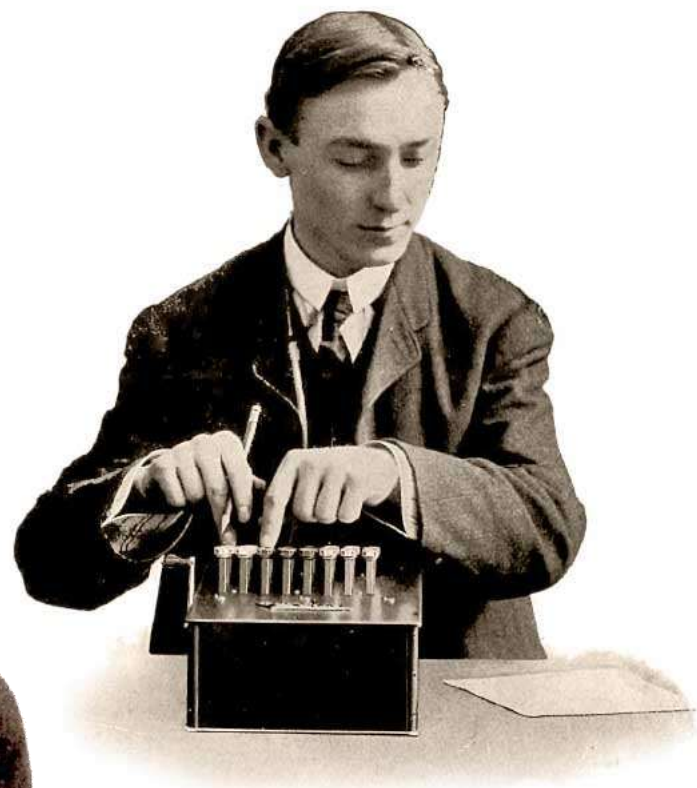
Was ein Computer („programmgesteuerter Rechenautomat“) ist und wie er im Prinzip funktioniert, erläuterte man seinerzeit (hier: noch 1964) am besten mit Bezug auf die bekannte Arbeitsweise einer Rechnerin.

„Wenn wir uns die Aufgabe stellen, diese vier Prozesse von einem Automaten nach einem vorgelegten Programm durchführen zu lassen, so haben wir Rechnerin, Tischrechenmaschine und Rechenblatt (Bild a) durch ein Gerät mit dem gleichen ‘Leistungsvermögen’ zu ersetzen (Bild b).“

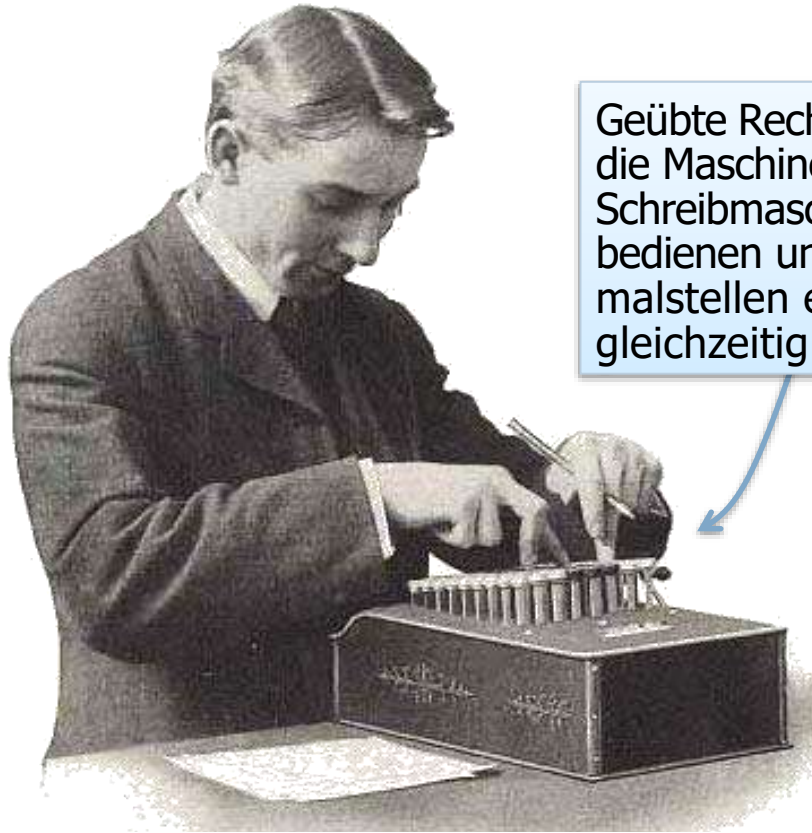
[Franz Stuchlik: Programmgesteuerte Universalrechner, 1964]







# Hochgeschwindigkeitsrechnen



Geübte Rechner können die Maschine (wie eine Schreibmaschine) blind bedienen und die Dezimalstellen einer Zahl gleichzeitig eingeben



*Deutsches Wörterbuch der Brüder Grimm* [ca. 1886]: **Rechner**, m. der da rechnet, 1) als Beamter, der einem Herrn Rechnung zu legen und Verwaltung zu führen hat, 2) der Rechenaufgaben löst.

# Die Rechenmaschine als Instrument der Rationalisierung



**NEVER HEARD OF THE COMPTOMETER.  
TOO BAD,  
HAVING TROUBLE WITH THAT TRIAL BALANCE.**



MESSRS. HENRY SCHREMPF & CO., FORT ATKINSON, WIS., WRITE:  
"We have concluded that we cannot get along without the Comptometer. We are getting along very nicely indeed with one less clerk in our office since we got the machine."



# Rechnen ohne Rechenkenntnisse



Früher mussten Rechner(innen) selbst rechnen – Maschinenrechner brauchen das nicht mehr:

*Die Rechenmaschine »Brunsviga« verkörpert einen Maschinentypus, der in bezug auf **weitestgehende Ausschaltung anstrengender Geistesarbeit** das Erreichbare in vollendetster Form verwirklicht hat. Ihre Bedienung ist von unübertrefflicher Einfachheit und stellt **keinerlei Anforderungen an die geistigen Fähigkeiten des Rechners**. Selbst wenn dieser mit der Kunst Adam Rieses auf beständigem Kriegsfuße steht, ist er imstande, sich mit ihrer Hilfe zum Rechenmeister par excellence auszubilden.*

[Aus: Wilhelm Trautschold: Die Rechenmaschine Brunsviga – ihre Bedeutung für Staat, Wissenschaft, Technik und Handel, 1910]

Der franz. Mathematiker **Gaspard de Prony** organisierte Ende des 18. Jh. menschliche Rechner in einer Art Fabrik, in der Logarithmen, trigonometrische Funktionen, aber auch Umrechnungstabellen für die Dezimaleinteilung von Winkeln und Zeitangaben, am Fließband berechnet wurden. Der Bedarf entstand durch die Einführung des metrischen Systems im Zuge der franz. Revolution. (Insbesondere sollte auch die Trigonometrie „dezimalisiert“ und damit „demokratisiert“ werden.) «Before the 19th century, calculation was regarded as a task for the academics, while afterwards, calculations were associated with unskilled laborers. This was accompanied by a **shift in gender roles** as well, as women, who were usually underrepresented in mathematics at the time, were hired to perform extensive computations for the tables as well as other computational government projects until the end of World War II. This shift in the interpretation of calculation was largely due to de Prony's calculation project.» [Wikipedia] Pronys Rechenfabrik war es auch, die **Charles Babbage** zu seinen Rechenautomaten inspirierte.

# Rechner und Rechnerin als Beruf

Einige Rechner waren i.W. als Buchhalter tätig, aber nicht immer wurde ihre Tätigkeit hoch angesiedelt: „Ähnlich der Tätigkeit der Stenotypistin gibt es eine solche der **technisch-wissenschaftlichen Rechnerin**. Dazu sind **keine mathematischen Vorkenntnisse**, sondern allein gute Auffassungsgabe und vor allem menschliche Zuverlässigkeit vorauszusetzen. Auf die heute noch wenig ausgenutzte Möglichkeit, Zahlenrechnungen durch **Hilfskräfte** ausführen zu lassen, sei hier ausdrücklich hingewiesen. Die weitgehende Schematisierung vieler moderner Rechenverfahren kommt dem in bemerkenswerter Weise entgegen.“ [Aus: Rudolf Zurmühl: Praktische Mathematik für Ingenieure und Physiker, 1953]



## Rechner und Rechnerin als Beruf (2)

Im April 1942 wurde in einem internen Memo der [NACA \(National Advisory Committee for Aeronautics\)](#), die Vorgängerinstitution der NASA) über die menschlichen Rechner der Institution berichtet. Bei der NACA waren viele Berechnungen zur Analyse von Messdaten aus Windkanalexperimenten sowie aerodynamische Berechnungen zur Optimierung von Flügeln, Propellern und ganzen Flugzeugen durchzuführen. Die „Computer“ waren ausschliesslich (junge) Frauen, für die in jener Zeit generell die Bezeichnung „girls“ (auch untereinander) üblich war. Bei den Rechenmaschinen, die sie benutzten, sind die reinen Additionsmaschinen („Comptometer“) von den nachfolgend als „automatic calculators“ bezeichneten Maschinen mit Multiplikationsfähigkeit zu unterscheiden.

*NACA Memo →*





# Rechner und Rechnerin als Beruf (3)

## Auszüge aus dem 1942-Memo „Computing Group Organization & Practices at NACA“:

“The **personal qualifications** for these computers are not very rigid. These computers are all women who have obtained their jobs through Civil Service. [...] The girls who operate the Comptometers have usually passed a proficiency test on that type of machine, and they are usually not college graduates. There is ample room for their talents, however, because the volume of work often necessitates computers who can perform the routine machine operations with great speed, but who need not have much logical insight into what the result should be or how they should check, etc. The heads of the groups are college graduates, as are the majority of all the computers. Preference is given to those with major interests in mathematics or science (preferably physics), but of late these restrictions are being lowered so that one college course in mathematics has been accepted as qualifying. A good number of the computers are former school teachers. Their ages may average near 21, but there are a surprising number nearer 30 years old. [...]

The **automatic calculator** is usually the Friden or Marchant, while the comptometer was the Comptometer (Trade Name). The computers were also furnished with 20 inch (log-log duplex) slide rules.

If the computer has proficiency in the operation of a comptometer (which takes about three months training to attain), she can perform all the same operations available on the automatic calculating machine in practically the same time. [...] A set of five-place logarithmic tables and trigonometric tables is also provided [...].

The \$1440 position carries the title of **Junior Computer**, while the better salaried position (\$1620) would be for an **Assistant Computer**, and finally a **Computer** would be the title corresponding to the \$1800 bracket. A **Head Computer** earns \$2000 [...].

# Rechner und Rechnerin als Beruf (4)

There is a **large amount of simple calculation** required in the work here. [...] On the other hand, some of the calculations are sent to the computers in the form of **complicated formulas** which necessitate a knowledge of **trigonometry** and sometimes of mathematics involving the **calculus**. In general, however, the group head would reduce this more complicated work down to tabular form requiring rather routine operations before it would be given to the machine operator. Most of the work coming from the engineers is accompanied by a memo of calculating instructions or work-of-mouth explanations."

<https://crgis.ndc.nasa.gov/crgis/images/3/30/L-33025.jpg>



*NACA-Junior Computers mit Rechenschieber, 1945*



[https://crgis.ndc.nasa.gov/historic/File:L.\\_Betty\\_Stafford\\_R.\\_Jeanne\\_Smith.jpg](https://crgis.ndc.nasa.gov/historic/File:L._Betty_Stafford_R._Jeanne_Smith.jpg)

*Die beiden NACA-Computer Betty Stafford und Jeanne Smith mit einer Friden-Rechenmaschine*



*NACA-Computer bei der Analyse von Messdaten aus  
Windkanalexperimenten, 1943*

<https://images-assets.nasa.gov/image/ARC-1943-AAL-4961/ARC-1943-AAL-4961~orig.jpg>  
<https://picryl.com/media/computers-calculating-data-from-teh-ames-16-foot-wind-tunnel-c47f1c>





# Computing is our duty

Dass früher gerade in der **Astronomie** das Rechnen wichtig (und gleichzeitig mühsam) war, verdeutlicht auf nette Weise das parodistische Singspiel "The Observatory Pinafore", das **1879** der Astronom Winslow Upton verfasst hatte. Upton war damals Mitarbeiter am Harvard Observatory, später arbeitete er als "computer" und wurde schliesslich Professor an der Brown University (Rhode Island). Die erste Szene spielt im "Computing Room" der Sternwarte und wird vom Chor der "computers" mit folgendem Refrain eröffnet:

*We work from morn till night,  
For **computing is our duty**;  
We're faithful and polite,  
And our record book's a beauty;  
With Crelle and Gauss, Chauvenet and Peirce,  
We labor hard all day;  
We add, subtract, multiply and divide,  
And we never have time to play.*

Die genannten vier Personen stehen für die von ihnen propagierten mathematischen und astronomischen Methoden, die bei der täglichen Arbeit der computers eine wichtige Rolle spielten: August **Crelle** (1780 – 1855) war deutscher Mathematiker und Ingenieur; William **Chauvenet** (1820 – 1870) war als amerikanischer Mathematiker und Astronom ein bekannter Lehrbuchautor mit Werken zur sphärischen Trigonometrie und Astronomie; mit **Peirce** ist der Harvard-Mathematiker und Astronom Benjamin Peirce (1809 – 1880) gemeint, der Vater des Semiotikers Charles S. Peirce (1839 – 1914), der u.a. auch nachwies, dass aus NAND bzw. NOR alle anderen aussagenlogischen Junktoren abgeleitet werden können.



*Eine Singspiel-Szene mit dem Computer-Chor in einer Aufführung vom 31.12.1929 in Harvard*

# A large force of computers

- You have a large force of computers, Sir.  
- Director: Yes, quite large – most enough for a good dance in spare hours.  
*Dialog im "Observatory Pinafore"*

Später in der Operette beklagt eine der Rechnerinnen in Balladenform die Mühsal der Computertätigkeit; die vielen Fehler stellen eine ständige Plage dar, und die Finger tun dazu auch noch weh:

*Sorry her lot who adds not well / Dull is the mind that checks but vainly,  
Heavy the sorrow that bows the head / When fingers are tender and the ink is red.*

Sie erläutert, dass sie ganz wund Finger von der aggressiven roten Tinte bekommt – und es gibt doch so viele rote Zahlen in ihrem Laborbuch! Die Regeln aber sind klar und unerbittlich: "It is a good rule that all mistakes should be corrected in red" bekräftigt Professor William Rogers.

„Observatory women computers“ des Harvard College Observatory auf Fotografien der beiden „computer rooms“ von 1898/91. Rechenmaschinen sind noch keine



<https://hea-www.harvard.edu/~fine/Observatory/women.html>

zu erkennen (erst auf einem Bild von 1925 dieses Ortes taucht dann eine mechanische Rechenmaschine auf), dafür aber, bei näherem Hinsehen, einige Tintenfüßer und Griffel.





*Rechendienst der Hamburger Sternwarte*



*Rechenbüro bei der Firma AEG*



*U-M Statistics  
Lab, 1943*

*Rechenzentrum  
Sparkasse Köln,  
1950er-Jahre*

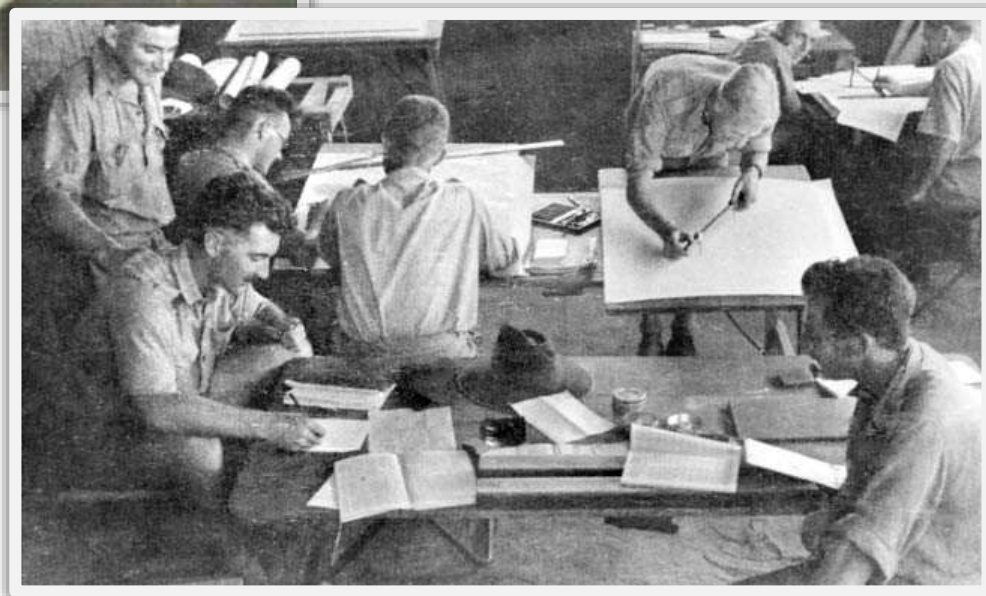






1942, Adelaide River, Northern Territory, Australia: The **computing staff** of a field survey section do all major triangulation, traverse and astronomical computations. The main tools of trade are: trigonometrical tables, nautical almanac, computing machines and slide rules. [www.awm.gov.au/collection/C11224](http://www.awm.gov.au/collection/C11224)

1941: Surveyors and draftsmen work on maps in the **computing centre**, Hut 95, British Mandate of Palestine. [www.awm.gov.au/collection/C1142502](http://www.awm.gov.au/collection/C1142502)



# „Offer you the position of a Junior Computer“

Brief vom 12. Jan. 1943

Philadelphia Computing Unit  
3436 Walnut Street,  
Philadelphia, Pa.

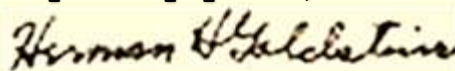
Miss Doris Blumberg  
2815 Wharton Street  
Philadelphia, Pennsylvania

Dear Miss Blumberg:

The third section of the training course, Mathematics for Ballistic Computations, is now being organized, and I am writing to offer you the position of a Junior Computer at a salary of \$1440.00 per annum. Upon satisfactory completion of the course you will be promoted to Assistant Computer, SP-4, and will receive a yearly salary of \$1620.00 plus, at the present time, an additional 20% for overtime. We work six days a week, which makes the annual salary about \$1940.00.

Please let me know immediately whether or not you will accept the position. If you do accept the position, you will be notified shortly as to the date the course will start.

Very truly yours,



HERMAN H. GOLDSTINE,  
1st Lt., Ord. Dept.

Die Zwillingsschwestern Doris (1925–2015) u. Shirley (1925–2009) **Blumberg** arbeiteten während des 2. Weltkriegs an der University of Pennsylvania als "Computer". "Oh, during the war we worked as mathematicians for the Army. We were recruited right out of high school." **Herman Goldstine** (1913–2004), Mathematiker und Sohn deutsch-jüdischer Einwanderer, leitete seinerzeit ein Projekt zur Berechnung von Schusstafeln. "The firing table calculations were accomplished by about one hundred women operating mechanical desk calculators." Er war auch einer der Entwickler des **ENIAC**-Computers und arbeitete später eng mit John von Neumann am Institute for Advanced Study in Princeton zusammen.

# „Offer you the position of a Junior Computer“



Die Zwillingsschwwestern **Doris** und **Shirley Blumberg** sowie **Herman Goldstine** (ca. 1943)



# „Junior Computers“

*Links:* Ein Kurs in höherer Mathematik für zukünftige „Junior Computers“, ca. 1943 an der University of Pennsylvania mit den Blumberg-Zwillingen links vor der Wandtafel; im Vordergrund wird eine mechanische Rechenmaschine genutzt.

*Unten:* Doris Polsky (geb. Blumberg) und Shirley Blumberg Melvin ~1943 bzw. 2007.



# Rechnende Wissenschaftler



Mary Sherman Morgan (1921 – 2004)

Wissenschaftler und Ingenieure nutzten oft bis in die 1970er-Jahre selbst mechanische und elektromechanische Rechenmaschinen

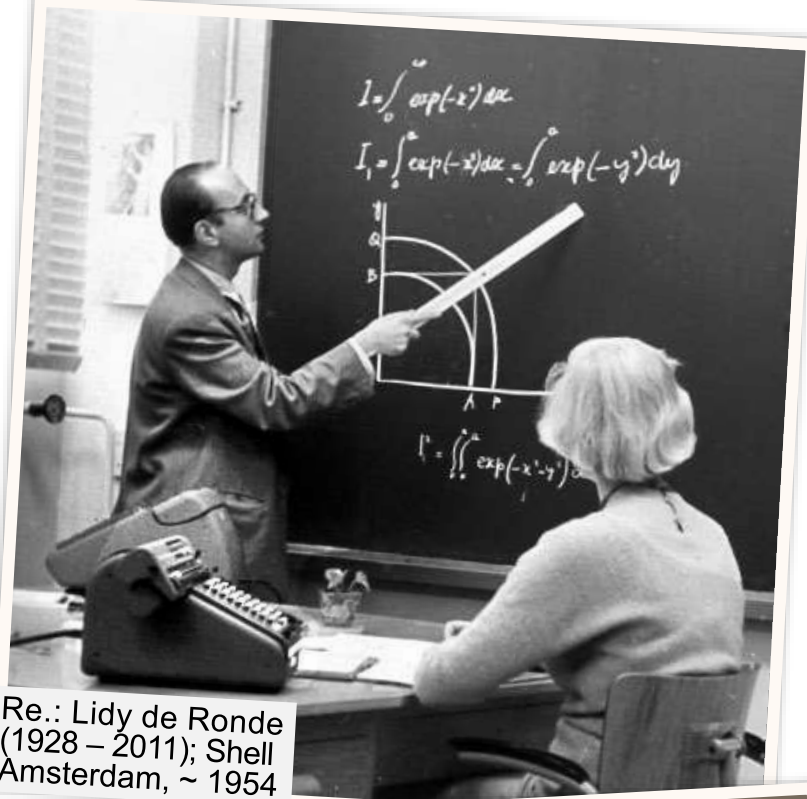


Grace Hopper (1906 – 1992)

Elizabeth  
Roemer  
(1929 –  
2016)







Re.: Lidy de Ronde (1928 – 2011); Shell Amsterdam, ~ 1954



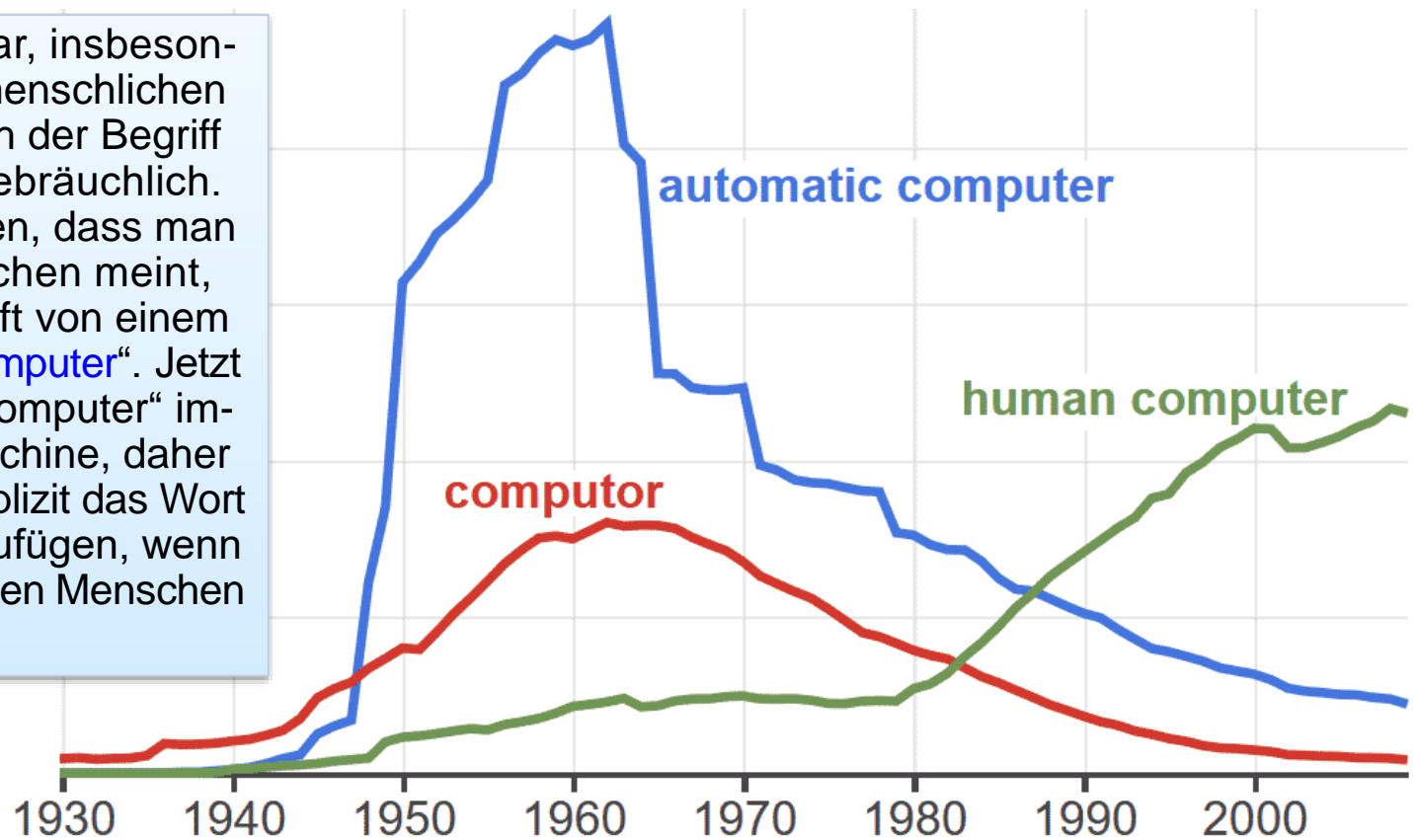
Human computers certainly did work hard all day, and had the aches and pains to show for it: elbow joints inflamed from cranking calculator handles, or fingers and thumbs cramped from penciling figure after figure on to graph paper. For two centuries the modern scientific enterprise was built on their efforts.  
 -- Jon Agar.





# Menschliche und automatische Rechner

Anfänglich war, insbesondere für die menschlichen Rechner, noch der Begriff „**computor**“ gebräuchlich. Um zu betonen, dass man keinen Menschen meint, sprach man oft von einem „**automatic computer**“. Jetzt bezeichnet „computer“ immer eine Maschine, daher muss man explizit das Wort „**human**“ hinzufügen, wenn man damit einen Menschen meint.

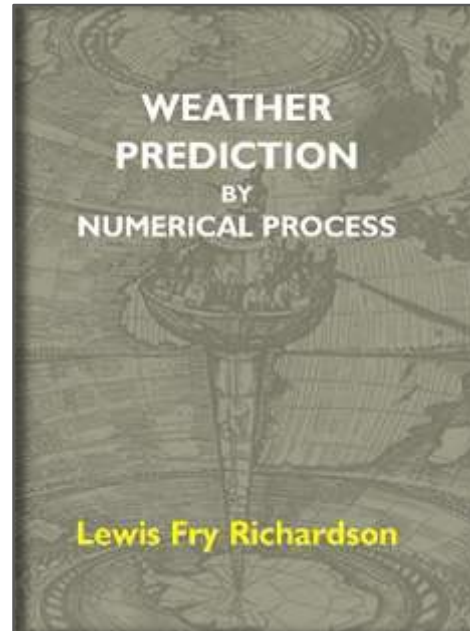


# Zurück zur **Wetterprognose** und zu **Lewis Fry Richardson (1881–1953)**

Historische Notizen  
zur Wetterprognose

*Perhaps some day in the dim future it will be possible to **advance the computations faster than the weather advances** and at a cost less than the saving to mankind due to the information gained. But that is a **dream**.*

1922



Richardson war ein britischer Meteorologe. Er begründete um 1915 die Methode der numerischen Wettervorhersage. Als überzeugter Pazifist wechselte er in den 1920er-Jahren in die Friedensforschung. 1926 erfolgte die Berufung zum Fellow der Royal Society.

# Historisches zur Wetterprognose

## – mit und ohne Computer

Früher fürchtete man den Zorn der Götter. Heute schimpft man über die Meteorologen. – Anon.

Die **Wettervorhersage** ist ein lehrreiches Beispiel für eine bedeutende, oft unterschätzte, **Anwendung von Computern, die einen hohen Nutzen stiftet**. Die schnellsten und teuersten Supercomputer werden heute für die Wetterprognose benutzt – dabei werden mathematisch-physikalische Modelle für die Atmosphärendynamik mit Daten vielfältiger Sensoren sowie mit Meldungen von Satelliten und anderen Quellen gespeist. Die Lösung der Differentialgleichungen der Modelle erfolgt approximativ in einem Gitterraster mit kleinen diskreten Zeitschritten. Dass heute mehrtägige Prognosen relativ zuverlässig sind, ist gleichermassen eine Erfolgsgeschichte der **Meteorologie** (adäquate physikalische Modelle), der **Mathematik** (effizientes Lösen partieller Differentialgleichungen unter Beachtung der numerischen Stabilität) und der **Informatik** (Supercomputer, Clustercomputer, Parallelrechner und deren Programmierung) über die letzten rund 100 Jahre.

Schon lange bevor man die physikalischen Gesetze hinter den Wetterphänomenen einigermaßen verstanden hatte, war es wichtig, die Wetterentwicklung anhand von





# Historisches zur Wetterprognose (2)

**Zeichen der Natur** abschätzen zu können – denn historisch war der Mensch den Naturgewalten und dem Wetter fast schutzlos ausgeliefert, rechtzeitig die Zeichen zu erkennen, sich in Schutz zu bringen oder die landwirtschaftlichen Tätigkeiten auf die wahrscheinliche Wetterentwicklung hin zu optimieren, konnte über Leben und Tod, Hunger und Wohlstand oder Kriegsglück und -verderben entscheiden.

In vorgeschichtlicher Zeit wurde das Wetter dem schicksalhaften Wirken von Göttern zugeschrieben. Gewitter und Sturm wurden als furchteinflössende und wirkungsvolle Phänomene wahrgenommen, daher sind **Wettergottheiten** meist mächtige Wesen und gehören zu den grossen Göttern (wie Zeus bei den Griechen, Thor bzw. „Donar“ bei den Germanen, oft dargestellt mit einem Blitz); sogar im monotheistischen Christentum übernimmt der Apostel Petrus die Rolle eines „Ersatzwettergottes“.

In der Landwirtschaft spielt das „richtige“ Wetter stets eine grosse Rolle. Schon vor 5000 Jahren schrieben Babylonier und Ägypter Wettersprüche auf, die mit unseren **Bauernregeln** vergleichbar sind. Besonders zuverlässig sind die oft auf tradierten Erfahrungen beruhenden Bauernregeln („das Wetter am Siebenschläfertag sieben Wochen bleiben mag“) aber nicht.



[http://voilejmh.free.fr/voile/fichiers/meteo/devin\\_1.jpg](http://voilejmh.free.fr/voile/fichiers/meteo/devin_1.jpg)

# Historisches zur Wetterprognose (3)



Um eine wissenschaftliche Wettererklärung bemühte sich wohl erstmalig [Aristoteles](#) um 350 v. Chr. In seiner „[Meteorologica](#)“, also der „Lehre von den Himmelserscheinungen“ (μετ-έωρος: in die Höhe gehoben, in der Luft schwebend) beschrieb er nicht nur das Wetter, sondern auch Kometen und andere Ereignisse des Himmels. Fast 2000 Jahre lang blieb es das fundamentale Lehrbuch der Meteorologie. Es fehlten lange Zeit allerdings Messinstrumente (und vielfach auch die Vorstellung davon, welche relevanten

Größen es gibt, die man messen sollte), um wetterbestimmende Faktoren quantitativ beobachten zu können. Seit der Antike gab es in dieser Hinsicht nur die Wetterfahne zur Bestimmung der Windrichtung und den Regenmesser.

Das Jahr 1592 brachte mit der Erfindung des [Thermometers](#) durch [Galileo Galilei](#) einen wichtigen Fortschritt. Sein Schüler [Evangelista Torricelli](#), der Erfinder des Quecksilber-[Barometers](#), bemerkte Mitte des 17. Jahrhunderts, dass einer Schlechtwetterperiode eine Abnahme der Höhe der Quecksilbersäule vorausging. („Man hat gefunden, dass der Mercurius bey Sonnenschein ziemlich hoch gestanden, bey regenwetter [...] gefallen, bei starken winden am tieffsten herabgestiegen“ bemerkte Leibniz ca. 1672.) Im 18. Jahrhundert war dann



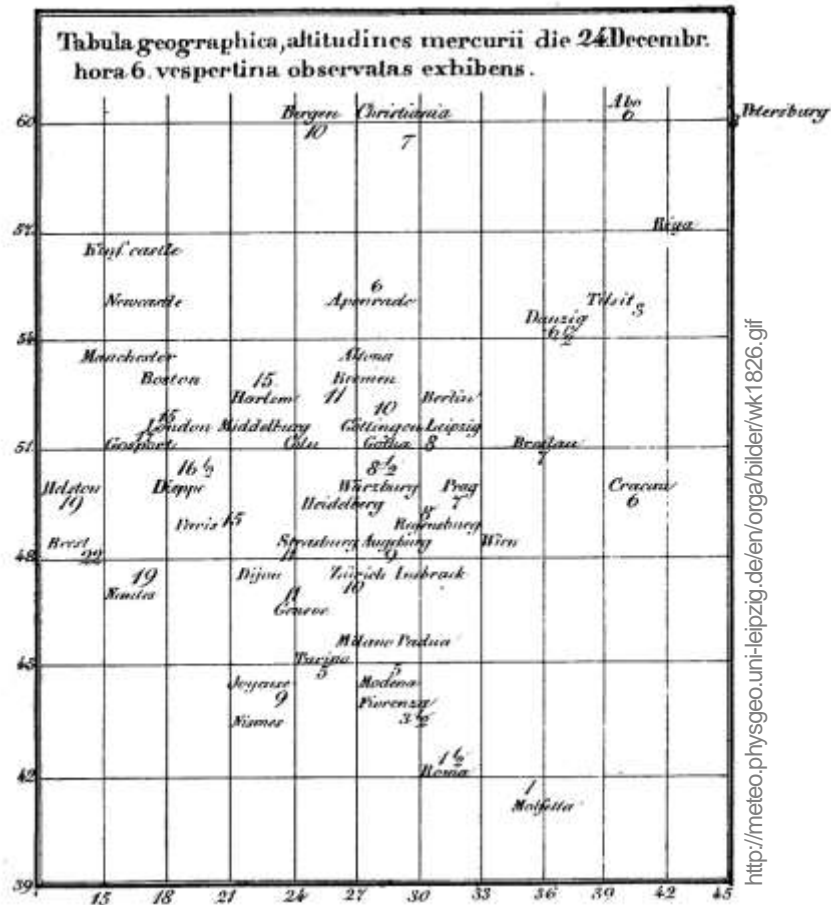
der grundsätzliche Zusammenhang zwischen diversen meteorologischen Erscheinungen und Schwankungen von Messwerten (Wind, Luftdruck, Feuchtigkeit, Temperatur etc.) bekannt, es wurde aber auch deutlich, dass grossräumigen Beobachtungen und deren Zusammenschau notwendig sind, um meteorologische Erscheinungen und ihre Abläufe wirklich verstehen zu können.



# Historisches zur Wetterprognose (4)

Der Physiker, Mathematiker und Astronom **Heinrich Wilhelm Brandes** (1777 – 1834) hatte Anfang des 19. Jahrhunderts die Idee, das bis dahin übliche zeitliche Nacheinander des Wetters an einem Ort durch ein räumliches Nebeneinander des Wetters vieler Orte zu einem gemeinsamen Zeitpunkt zu betrachten („...über gleichzeitige Witterungs-Ereignisse in weit voneinander entfernten Weltgegenden... Einen solchen, noch nie mit einiger Vollständigkeit gelieferten Versuch theile ich hier mit, indem ich die in allen Gegenden von Europa und in einigen andern Weltgegenden angestellten Witterungsbeobachtungen vom Jahre 1783 zusammenstelle, um den ganzen Gang der Witterung, die gleichzeitigen Wechsel in näheren und entfernten Gegenden übersehen zu lassen.“) Ihm standen für das Jahr 1783 Wetterdaten von rund 30 Orten zwischen den Pyrenäen und dem Ural zur Verfügung; durch seine im Nachhinein konstruierte „**synoptische**“ Darstellung auf einer Karte erkannte er zusammenhängende Gebiete ähnlichen Wetters und deren Verlagerung quer durch Europa.

Das Zusammensuchen der Daten aus verschiedenen Quellen und die manuelle Aufbereitung war seinerzeit sehr aufwändig. Brandes schrieb dazu: „Dieses Vergleichen der an 30 Orten angestellten Beobachtungen,



Brandes' Wetterkarte von 1826

<http://meteo.physgeo.uni-leipzig.de/en/orga/bilder/wk1826.gif>



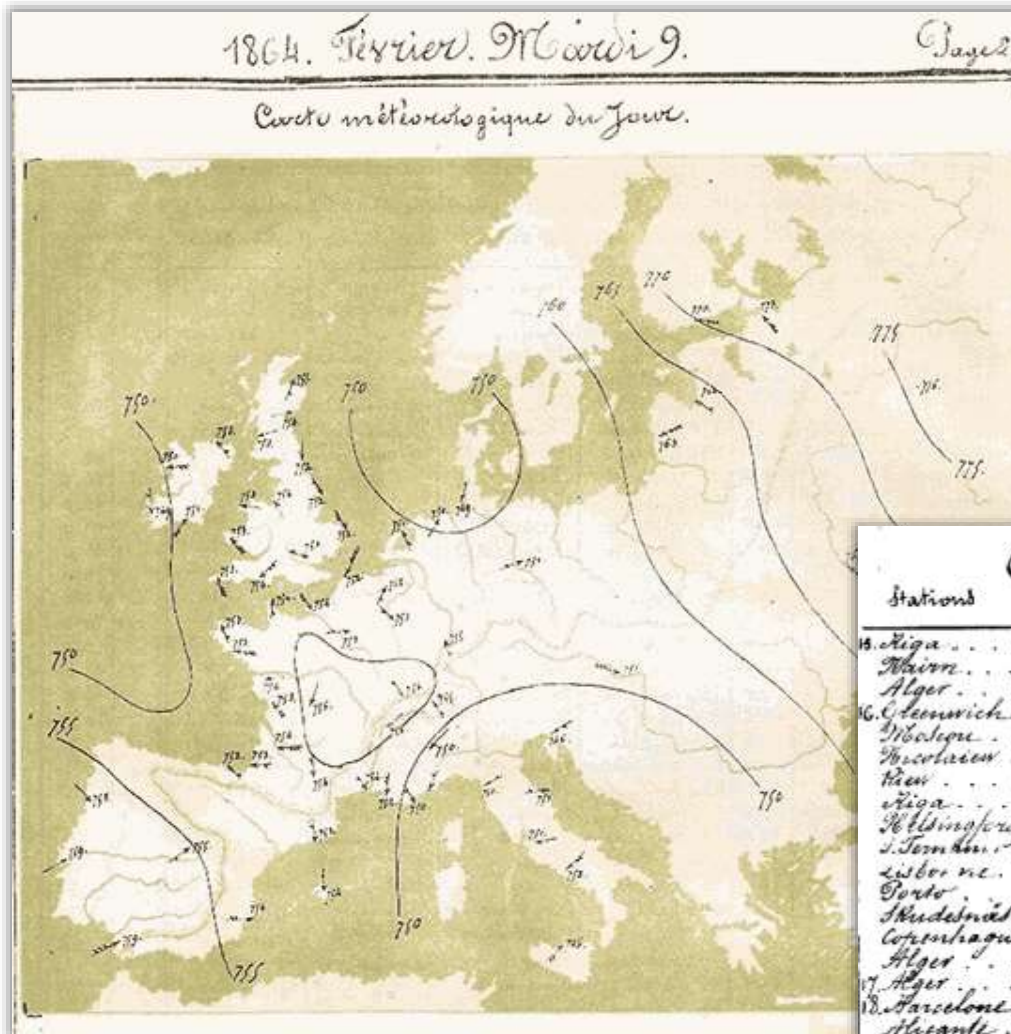
# Historisches zur Wetterprognose (5)

wo an jedem Tage etwa 300 bis 400 einzelne Angaben vorkommen, das ermüdende Nachforschen, ob etwa noch eine unbenutzte Merkwürdigkeit in den Beobachtungen vorhanden sey, die so oft erfolglosen Versuche etwas Regelmäßiges in diesem Gewirre zu entdecken, die immer wiederkehrende Besorgniß noch nicht alles versucht zu haben, wodurch Licht in dieses Chaos gebracht werden könnte, und die daraus entspringende Nothwendigkeit, die schon vollendete Arbeit immer noch einmal wieder anzufangen, endlich das niederschlagende Gefühl, doch nicht so viel Befriedigendes gefunden zu haben, – als dieser Arbeit angemessen schie- ne; – das alles kann nur der recht würdigen, der einmal selbst etwas Aehnliches versucht hat.“

**Wetterkarten quasi in Echtzeit** erstellen, wie es für eine Prognose erforderlich ist, konnte man allerdings erst Mitte des 19. Jahrhunderts, als mit dem **elektrischen Telegrafen** eine sofortige Nachrichtenübermittlung über weite Distanzen möglich wurde. Nachdem schon 1794 Charles-Gilbert Romme, französischer Mathematiker und Politiker während der französischen Revolutionszeit, vorgeschlagen hatte, den optischen Telegrafen bzw. die Semaphore-Strecken von Claude Chappe zur Übermittlung von Wetterwarnungen zu benutzen, regt 1842 der österreichische Meteorologe Karl Kreil eine solche Übermittlung durch elektrische Drahttelegrafie an. Auf der **Weltausstellung 1851 in London** demonstrierte dann die Electric Telegraph Company die Leistungsfähigkeit ihrer telegraphischen Dienste dadurch, dass zwei Monate hindurch täglich eine **synoptische Wetterkarte** nach den telegraphischen Meldungen von 22 Stationen gezeichnet wurde. Ab **1863** veröffentlicht die **Pariser Sternwarte** unter **Urbain Le Verrier** täglich Wetterkarten mit Isobaren auf Grund telegraphischer Wetterberichte; 1871 folgte das U.S. Weather Bureau. Die Wetterkarten verdeutlichten die zeitliche Entwicklung der Fronten und regte an, sie auch als **Vorhersagemittel** zu nutzen.



# Telegrafische Wettermeldungen ab ca. 1850



Synoptische Wetterbeobachtungen (aber zunächst noch keine Vorhersagen) bald nach der Erfindung des **Telegrafen** ab Mitte des 19. Jahrhunderts; erster telegrafischer Wetterbericht in einer Zeitung (Daily News, London) am 14. 6. 1849; Karten mit Isobaren ab 1863

Observations en Retard. Janvier 1864.

Stations	Baromètre	Temp	Vents inférieurs	Stat du ciel	Stat de la mer	Notes de la veille à 8 h.
15. Algé . . .	779.3	-5.8	E faible	Couvert		
Maïm . . .	763.3	3.1	SO ad. fort	Pluie	Belle	5 faible
Alger . . .	771.8	10.3	O ad. fort	Pluie	Très beau	
16. Greenwich . . .	759.7	3.0	SE modéré	Couvert		
Néaple . . .	776.5	-11.1	N faible	Couvert		
Proche . . .	774.0	-17.1	N faible	Pluie		
Rien . . .	780.0	-19.0	N faible	Pluie		
Rio . . .	782.9	-9.6	E faible	Pluie		
Helsingford . . .	780.9	-5.1	E faible	Couvert		
S. Tom . . .	771.0	-13.6	SE mod. int.	Couvert	Très beau	
Lisbonne . . .	769.8	13.0	SE ad. fort	Pluie	Pluie	
Porto . . .	767.9	13.1	SE faible	Couvert	Pluie	
St. Pétersbourg . . .	777.1	1.2	SE fort	Pluie	Pluie	
Copenhague . . .	782.1	-5.1	S faible	Couvert	Pluie	SE fort
Alger . . .	772.3	11.5	O ad. fort	Pluie	Pluie	
17. Alger . . .	772.7	13.9	N faible	Couvert	Pluie	
18. Barcelone . . .	767.3	9.0	NE fort	Pluie	Pluie	
Alexandrie . . .	767.0	10.4	N mod.	Couvert	Pluie	
Palma . . .	767.7	10.5	N mod.	Pluie	Pluie	
Aïlbar . . .	766.4	8.0	NE ad. fort	Pluie	Pluie	

Wetterkarte mit Isobaren und Windsymbolen von 1864

# Skepsis gegenüber Prognosen

Generell herrschte, gerade beim aufgeklärteren Bürgertum, lange Zeit grosse Skepsis gegenüber einer Wetterprognose, auch auf naturwissenschaftlicher Basis, vor. Man glaubte nicht recht daran, dass sich das Wetter einfacher voraussagen liesse als andere „gottgewollten“ Zukunftereignisse. Sogar der Abt [Mauritius Knauer](#) (1613–1664), der den [hundertjährigen Kalender](#) („Calendarium oeconomicum practicum perpetuum“) verfasste, mit dem seine Mönche in die Lage versetzt werden sollten, das Wetter in Franken vorherzusagen und so die klösterliche Landwirtschaft zu optimieren, urteilte über seine „Kollegen“: „Gerade jene Sternkundigen, die jährlich die Kalender zusammenstellen, hauen in der Regel so daneben, dass derjenige, der die Beschaffenheit der Witterung daraus abzunehmen sucht, sich notwendigerweise gründlich irrt und Schaden erleidet. Wenn nämlich die Voraussagen wirklich einmal eintreffen, so darf man ruhig annehmen, dass sie nicht irgendeiner Gelehrsamkeit, sondern nur dem Zufall zu verdanken haben.“



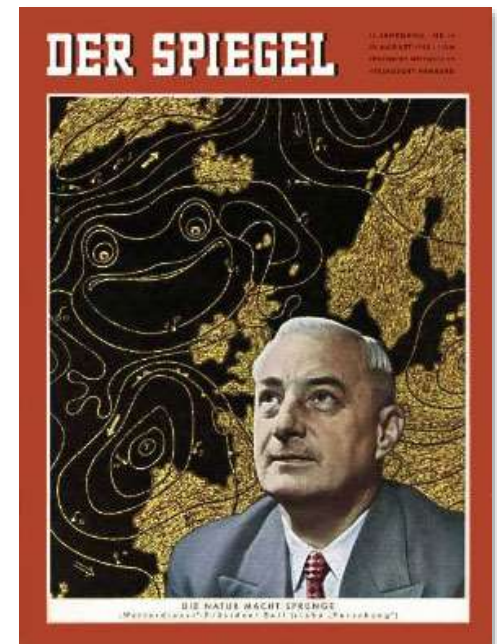
Und der preussische Reichskanzler [Otto von Bismarck](#) urteilte noch 1883 im Sinne der Staatsräson: „Es ist nicht nützlich, das Feld für böswillige Kritik und für feindliche Bearbeitung der Bevölkerung gegen die Regierung zu vergrössern, und ich möchte deshalb davon abraten, dass die Königliche Regierung [...] durch amtliche Organisation des Wetterbeobachtungsdienstes irgendwelche Verantwortlichkeit für die lokale Zuverlässigkeit von Wetterprophezeiungen übernehme.“ Aber auch Bismarck konnte sich nicht auf Dauer gegen den Zeitgeist stellen.



# Wetterbericht als staatliche Aufgabe

Mitte des 19. Jahrhunderts wurde die Wetterbeobachtung, deren Protokollierung und schliesslich auch die Vorhersage zunehmend institutionalisiert und staatlichen Anstalten (meist Sternwarten, die als bestqualifiziert für präzise Messungen galten) als Aufgabe übertragen. Einer der wichtigsten Antriebe hierfür war die rechtzeitige Warnung vor lebensbedrohenden Unwettern, insbesondere für Küstenbereiche und die Schifffahrt. Eine zuverlässige Wettervorhersage ist aber auch generell von grosser Bedeutung für die Wirtschaft, da viele Wirtschaftsprozesse wetterabhängig sind oder abhängig vom Wetter entsprechend optimiert werden können. Die Wochenzeitschrift „Der Spiegel“ formulierte es 1958 in einer Titelgeschichte so:

„Bauern wollen bei Frostgefahr wissen, wann sie ihr Spätgemüse ernten sollen; Zuckerfabriken interessieren sich dafür, wann sie ihre Rüben ungefährdet einfahren lassen können; Gas- und Elektrizitätswerke benötigen für ihre Dispositionen Temperatur- und Auskühlungsvorhersagen; Brauereien und Ausflugslokale wollen sich rechtzeitig auf das Sonntagsgeschäft vorbereiten; Zirkusunternehmen mit Zeltbauten möchten frühzeitig vor herannahenden Stürmen gewarnt werden; Grosskaufhäuser wollen wissen, ob sie am Wochenende Regenmäntel oder Badehosen hinter den verschlossenen Eingangstüren auslegen sollen; Transportunternehmer bevorzugen frostfreie Tage für den Versand von Getränken, Kartoffeln, Tinte und Leim; Filmgesellschaften möchten ihre Aussenaufnahmen möglichst in einer regenfreien Woche drehen; Autofabriken bestellen sich für ihre Rekordversuche Hinweise auf windstille Tage.“ Heute würde man dies ergänzen um Ölkonzerne, die Bohrinseln bei ruhigem Wetter transportieren wollen; Energiekonzerne, die den Ertrag von PV- und Windanlagen für den Day-Ahead-Handel benötigen; Paragleiter, die den Thrill suchen,...



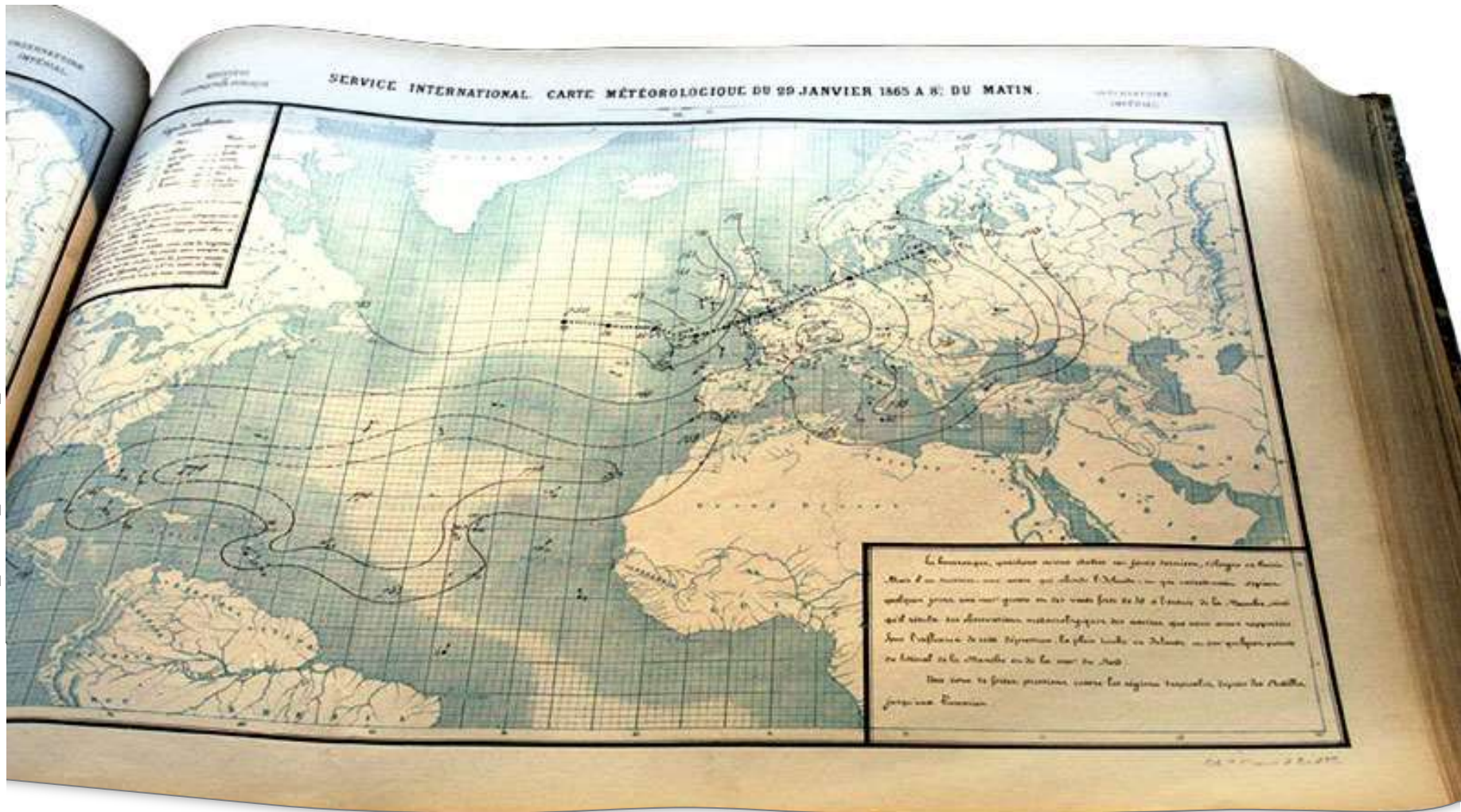
Ab 1876 verfasste die **Deutsche Seewarte** in Hamburg täglich Wetterberichte. Hauptzweck war zunächst die Warnung vor aufziehenden schweren Stürmen: Ist die Druckdifferenz zwischen zwei Isobaren bekannt, lässt sich aus ihrem Abstand auf die Windstärke bzw. Windgeschwindigkeit schliessen.

„Aus dem Gebiet von Island-Bodö bis Sizilien und von Irland bis Moskau erhält die Seewarte telegraphisch die täglichen Beobachtungen von 33 deutschen und 87 ausländischen Stationen. Die Telegramme bringen nach internationalem Schema Luftdruck, Windrichtung und Stärke, Temperatur und Wetter für den Abend des vorhergehenden Tages und außerdem für 8 Uhr (bei den ausländischen Stationen zum Teil für 7 Uhr) morgens; letzteren Werten sind noch die relative Feuchtigkeit, die Regenmenge, der Seegang und die Temperaturextreme für die letzten 24 Stunden, bei den deutschen Stationen auch noch der vorherrschende Himmelszustand (Wolkenform) und der Zug der oberen Wolken hinzugefügt. [...] Außerdem ist die Deutsche Seewarte die telegraphische Zentrale für den öffentlichen Wetterdienst im Deutschen Reich und übermittelt die Beobachtungen sowie textliche Übersichten telegraphisch den Wetterdienststellen.“ [Meyers Großes Konversations-Lexikon 1905; Bild: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Deutsche\\_Seewarte\\_1881\\_in\\_Hamburg.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Deutsche_Seewarte_1881_in_Hamburg.jpg)]





# Tägliche Wetterberichte mit Wetterkarten





# Schweizerische Meteorologische Centralanstalt

In der Schweiz wurde die systematische Wetterbeobachtung und –meldung Mitte des 19. Jahrhunderts von der „Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft“ (der heutigen Akademie der Naturwissenschaften Schweiz, SCNAT) organisiert, die 1863 dafür eine „Meteorologische Centralanstalt“ einrichtete. Sie konnte auf den Einsatz vieler Freiwilliger zählen, die sich zum Teil mehrere Jahrzehnte lang engagierten.

Franziska Hupfer schreibt dazu in ihrem Buch *Das Wetter der Nation. Meteorologie, Klimatologie und der schweizerische Bundesstaat, 1860-1914*: „1. Dezember 1863, 7 Uhr morgens: 88 Menschen in der Schweiz blickten konzentriert auf eine Quecksilbersäule und notierten daraufhin den abgelesenen, auf eine Kommastelle gerundeten Wert. Es war ihr erster Einsatz als Stationsinhaber des neu geschaffenen schweizerischen meteorologischen Beobachtungsnetzes. Dreimal täglich [um 7, 13 und 21 Uhr] massen sie von nun an die Temperatur, die Feuchtigkeit und den Druck der Luft, bestimmten allfällige Niederschlagsmengen, erfassten die Windrichtung und Windstärke, beobachteten den Zug der Wolken und schätzten den Grad der Bewölkung. Alle Werte mussten die Beobachter fein säuberlich in Tabellen eintragen, die sie jeweils nach Monatsende an die Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt in Zürich sandten. [...]

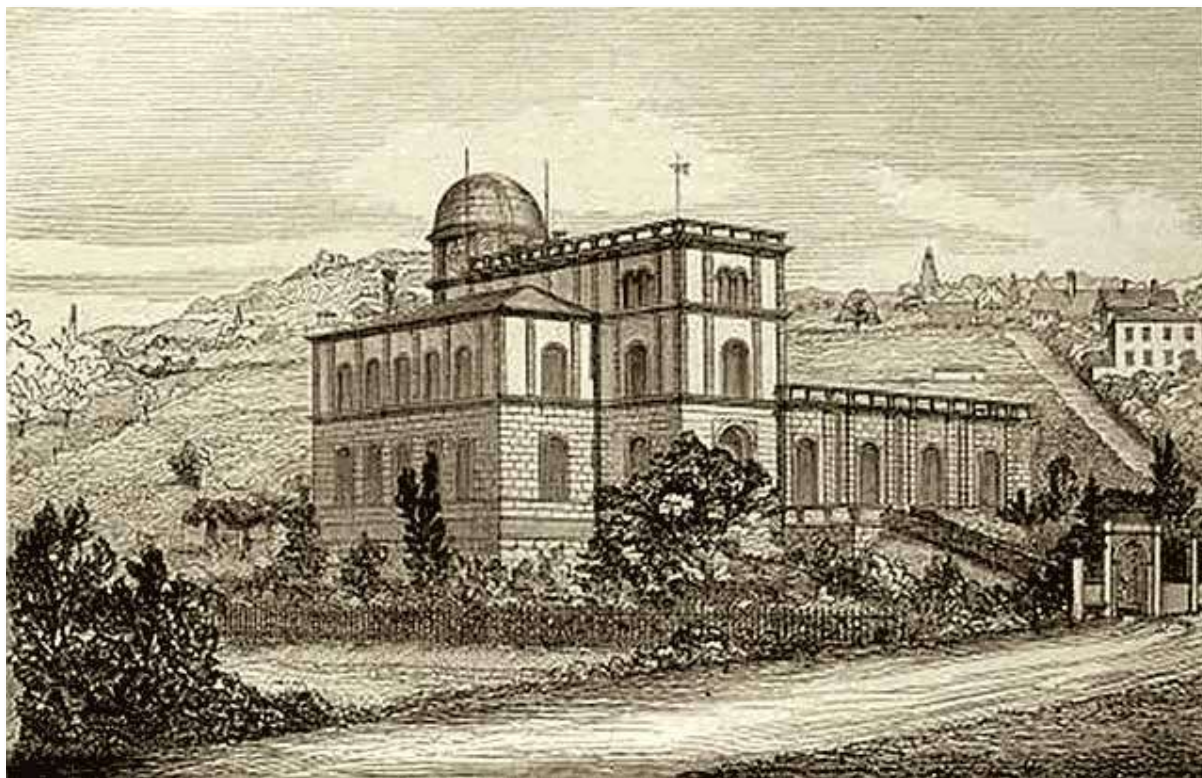
Unter den 88 Beobachtern, die im Dezember 1863 ihre Arbeit für das schweizerische meteorologische Netz aufnahmen, waren 25 Lehrer, 21 Geistliche, 11 Ärzte oder Apotheker, 9 Gastwirte, 4 Wissenschaftler, 3 Telegrafisten, 3 Uhrmacher und 2 Kaufleute. 9 weitere fielen in die Kategorie ‚andere Berufsarten‘. Lehrer und Geistliche machten also mehr als die Hälfte der Beobachter aus. Die Meteorologische Kommission war der Ansicht, dass sich Vertreter dieser beiden Berufe ‚wegen der Regelmässigkeit ihrer Lebensweise‘ am besten für die Beobachtungstätigkeit eigneten. [...]

# Schweizerische Meteorologische Centralanstalt

17 Jahre nach ihrer Gründung wurde die Meteorologische Zentralanstalt mit einem Bundesbeschluss verstaatlicht. Sie stand ab 1881 unter Oberaufsicht des Departements des Innern. [...] schrieb der Bundesrat, die Schweiz werde dadurch, auf die Höhe der Nachbarstaaten' gehoben.“

Anfangs gab es nur ein bescheidenes „Meteorologisches Buero“ für einen Assistenten sowie zwei

„Hilfsrechner“ im 2. Stock der ETH-Sternwarte (erbaut 1861–1864 von Gottfried Semper, Prof. für Architektur an der ETH, u.a. Erbauer des ETH-Hauptgebäudes und der Dresdner Oper); im Ort Oberstrass gelegen, den Zürich erst 1893 eingemeindete. Erster Direktor der Sternwarte und später auch der Meteorologischen Centralanstalt war der Mathematiker und Astronom [Rudolf Wolf](#) (1816–1893). Ihm folgte 1881 sein ehemaliger Assistent [Robert Billwiller](#) (1849–1905), dessen Namenskürzel „RB“ auf einigen hier abgebildeten Dokumenten zu sehen ist.



# Schweizerische Meteorologische Centralanstalt



Neubau 1949 in der Krähbühlstrasse am Abhang des Zürichbergs; im Jahr 2000 umbenannt in Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie („Meteo Schweiz“); 2014 Verlegung des Hauptsitzes an den Flughafen Zürich.





# Wetterbericht neu mit Prognose vom Observatorium Zürich ab Juni 1879

Anmerkung. Vielseitig geäußerten Wünschen entsprechend, führen wir mit heute in den täglichen Witterungsberichten zwei **Neuerungen** ein:

1) Die Reduktion der auf der Zürcher Sternwarte (470 Meter über Meer) beobachteten Barometerstände auf das Meeresniveau, wobei wir jedoch die reduzierten Stände aus verschiedenen Gründen nur in ganzen Millimetern geben.

2) Die Prognose für die Witterung des folgenden Tages auf Grundlage der hierseitigen Beobachtungen und des Berichtes des Pariser Observatoriums.

Erstere soll zur Vergleichung des jeweiligen hier beobachteten Barometerstandes mit den Daten der Pariser Depeschen, die für 7 Uhr Vormittags gelten, dienen und ist namentlich für diejenigen Leser von Werth, welche jene Daten mittelst der Isobaren kartographisch aufzeichnen.

In Betreff der Prognose halten wir eine nähere Erklärung, die in der Montagnummer folgen soll, nicht für ganz überflüssig.

R. B.

Die NZZ erachtete es für notwendig, eine Anmerkung zu den nun erstmalig erscheinenden Wetterprognosen zu machen. Die Meteorologie sei noch sehr weit von einer deduktiven Wissenschaft entfernt, jedoch machten verschiedentlich geäußerte Interessen „die Verwertung auch der blossen Wahrscheinlichkeiten“ wünschenswert und forderten diese sogar. Ginge es nur um das Interesse der Wissenschaft, „würde man sich wohl hüten, so unvollkommene Produkte der Spekulation, wie die Wetterprognosen in vielen Fällen sind, zu allgemeinerer Kenntnis zu bringen und einer so schonungslosen Kritik durch die nachfolgenden Tatsachen auszusetzen“.

# Wetterprognose des Observatoriums Zürich, 11. Juni 1879

## Witterungsbericht vom 11. Juni.

Mittheilung des Observatoriums in Zürich.  
Vormittags 7 Uhr.

	Höhe in Meter	Barometerst.		Temp. Cels. Grad.	Wind	Nieder- schl. mm.	Witterung
		ab- solut	auf Meer reduz.				
Zürich	470	725.2	766.1	14	SEo	6	hell.
Glarus	471	725.7	766.6	10	So	13	hell.
Bern	573	716.4	766.2	15	SEo	1	hell.
Genf 8 <sup>b</sup>	408	730.2	765.8	16	Ni	—	hell.
Basel	278	741.2	765.6	18	Ei	—	hell.
Lugano	275	741.2	765.2	17	SEo	—	hell.
Trogen	892	690.5	—	16	So	7	hell.
Gottshard	2100	597.2	—	4	Ni	—	hell.

Mittags 1 Uhr.

	Baro- meterst. absolut	Temp. Cels. Grad.	Unterschied gegen gestern 1h		Wind	Witterung
			Barom.	Temp.		
Zürich	724.7	25	+ 2.6	+ 3	SEo	hell.
Glarus	724.0	25	+ 2.2	+ 4	Ni	hell.
Bern	715.7	22	+ 2.1	+ 2	NEo	hell.
Genf	729.3	22	+ 1.9	- 1	Ni	hell.
Basel	740.5	25	+ 1.8	+ 3	Ei	hell.
Lugano	739.7	26	+ 0.5	+ 4	SEo	hell.
Trogen	690.7	20	+ 2.4	+ 3	SWo	hell.
Gottshard	598.0	9	+ 2.5	0	SEi	hell.

## Uebersicht der Witterung:

Ueber Zentral- und Südeuropa liegt heute eine Zone hohen Luftdruckes. Im südlichen Irland deutet dagegen das Fallen des Barometers und ein frischer Ostwind auf die Existenz einer Depression über dem Ozean, deren Bewegung noch nicht vorausgesehen werden kann. Gestern Nachmittag haben in der nördlichen und zentralen Schweiz vielfach Gewitter und Platzregen stattgefunden; Trogen meldet Hagel. Heute ist das Wetter in der ganzen Schweiz hell und ruhig.

## Isobaren:

Mm. 757 Valentia, Scilly; 760 Bodd, Hernosand, Wisby, Petersburg; 760 Greencastle, Brest, Rochefort; 765 Oporto, Barcelona, Lyon, Brüssel, Gand, Swinemünde, Breslau, Neapel, Bona.

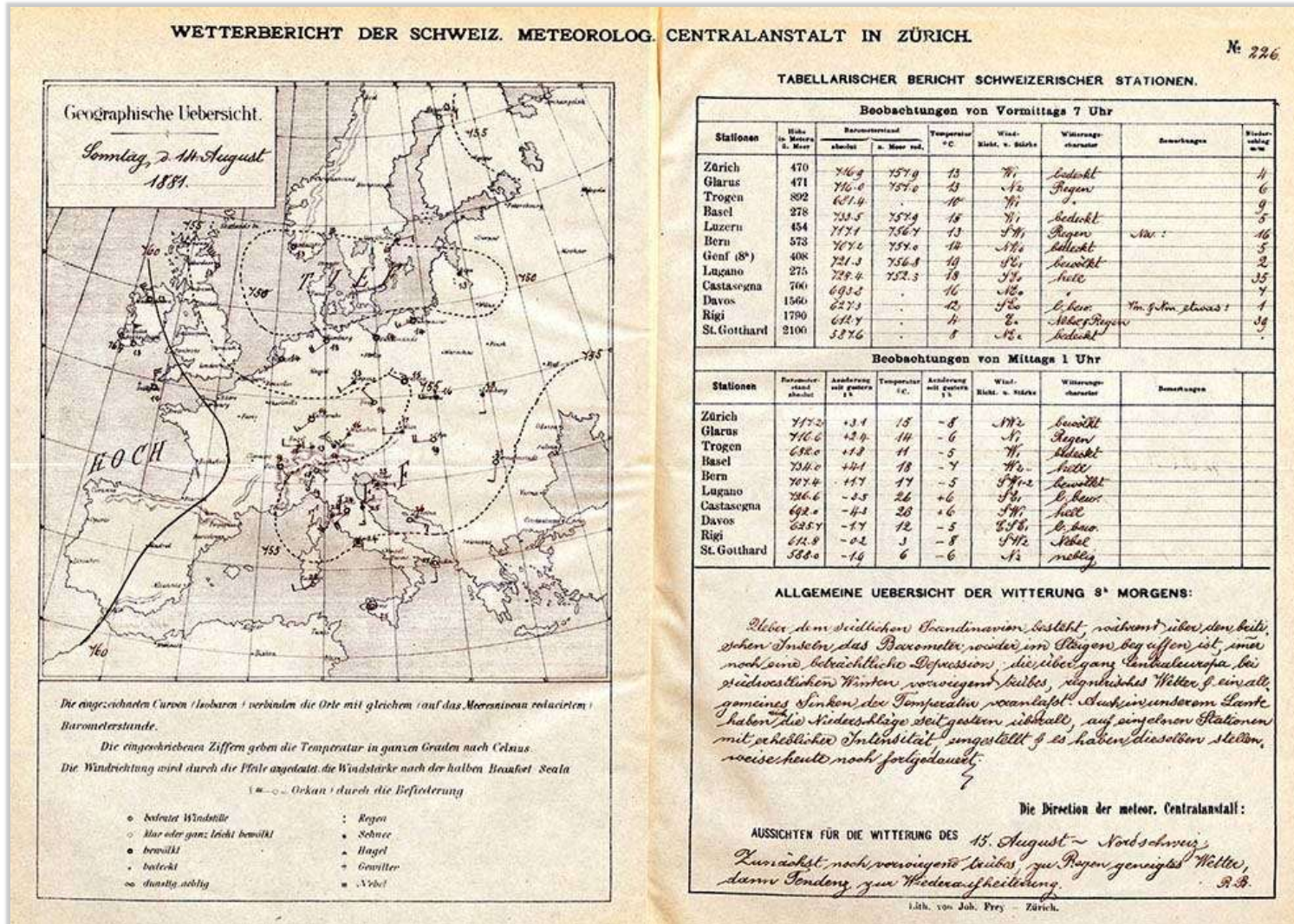
**Aussichten für die Witterung des 12. Juni in der Nordostschweiz:** Fortdauer des warmen, trockenen Wetters bei heiterem Himmel. R. B.

Mehrfach am Tag erscheinende Zeitungen (hier: NZZ) druckten die Wetterberichte ab.

„Ganz vernünftige Leute fragen, was solche Beobachtungen nützen [...] Es ist sich demnach nicht zu verwundern, dass sie jede Zeile bedauern, die die meteorologischen Beobachtungen dem Zeitungsklatsche entrücken.“ (Zeitgenosse)



# Wetterbericht der Schweizerischen Meteorologischen Centralanstalt in Zürich, 14. Aug. 1881



ETH-Bibliothek, Alte und Seitene Drucke, www.ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2015/09/prognosen-ein-wissenschaftliches-wagnis.html



# Wetterbericht der Schweizerischen Meteorologischen Centralanstalt in Zürich, 14. Aug. 1881 (2)

## TABELLARISCHER BERICHT SCHWEIZERISCHER STATIONEN.

### Beobachtungen von Vormittags 7 Uhr

Stationen	Höhe in Metern ü. Meer	Barometerstand		Temperatur °C.	Wind- Richt. u. Stärke	Witterungs- character	Bemerkungen	Nieder- schlag m/m
		absolut	a. Meer red.					
Zürich	470	716.9	757.9	13	W1	bedeckt		4
Glarus	471	716.0	757.0	13	N2	Regen		6
Trogen	892	681.4	.	10	W1	"		9
Basel	278	733.5	757.9	15	W1	bedeckt		5
Luzern	454	717.1	756.7	13	SW1	Regen	Nar.:	16
Bern	573	707.2	757.0	14	NW0	bedeckt		5
Genf (8 <sup>h</sup> )	408	721.3	756.8	19	SE1	bewölkt		2
Lugano	275	728.4	752.3	18	SE0	hell		35
Castasegna	700	693.8	.	16	N00	"		7
Davos	1560	627.3	.	12	SE0	l. bew.	Vm. & Nm. etwas!	1
Rigi	1790	612.7	.	11	E0	Nebel & Regen		39
St. Gotthard	2100	587.6	.	8	N02	bedeckt		.

Das schweiz. Klimamessnetz startete im Dezember 1863 mit 88 Stationen. Ab 1879 erhielt die Centralanstalt die Messwerte täglich von rund einem Dutzend Stationen per Telegramm und publizierte sie in ihrem Wetterbericht.

# Wetterbericht der Schweizerischen Meteorologischen Centralanstalt in Zürich, 14. Aug. 1881 (3)

## ALLGEMEINE UEBERSICHT DER WITTERUNG 8<sup>h</sup> MORGENS:

Über dem südlichen Scandinavien besteht, während über den britischen Inseln das Barometer wieder im Steigen begriffen ist, immer noch eine beträchtliche Depression, die über ganz Centralearopa bei südwestlichen Winden vorwiegend trübes, regnerisches Wetter & ein allgemeines Sinken der Temperatur veranlasst. Auch in unserem Lande haben <sup>sich</sup> die Niederschläge seit gestern überall, auf einzelnen Stationen mit erheblicher Intensität, eingestellt & es haben dieselben stellenweise heute noch fortgedauert.

Die Direction der meteor. Centralanstalt:

AUSSICHTEN FÜR DIE WITTERUNG DES

15. August ~ Nordschweiz;  
Zunächst noch vorwiegend trübes, zu Regen geneigtes Wetter,  
dann Tendenz zur Wiederaufhellung. R.B.



# Wetterwarte auf dem Säntis-Gipfel ab 1882

Die Errichtung einer bemannten Wetterstation auf dem Säntis Ende des 19. Jahrhunderts wurde seinerzeit als ein „wahrhaft patriotisches und zugleich eminent wissenschaftliches Unternehmen“ beschrieben. Den Kontext für dieses bemerkenswerte Vorhaben beschreibt Hermann Grosse (1911-1995), Staatsschreiber des Kantons Appenzell Innerrhoden, im Appenzellischen Jahrbuch von 1981. Die Ouvertüre seines Artikels „Hundert Jahre Säntis-Wetterwarte“ liest sich so:

„Der Wetterforscher oder Meteorologe erforscht und beobachtet die Vorgänge und Erscheinungen in der Atmosphäre so, wie sie ihm entgegentreten. Eine genügende Übersicht über sie zu erhalten, ist dem Einzelnen wegen des beschränkten Raumes unmöglich, ebenfalls kann er sie im unermesslichen Luftmeer nicht scharf abgrenzen. Daher blieb Mitte des 19. Jahrhunderts nichts anderes übrig, als zahlreiche Beobachtungsstationen in verschiedensten Lagen zu schaffen, mit deren Ergebnissen man arbeiten konnte. Nun entwickelte sich die Meteorologie erst recht, nachdem auf einem grossen Teil der Erdoberfläche meteorologische Beobachtungen gemacht und aufgezeichnet und diese verglichen und verarbeitet werden konnten. Bald zeigte es sich jedoch, dass für das gründliche Studium und die Erklärung der Vorgänge in der Atmosphäre die Beobachtungsstationen in den Niederungen nicht genügten, da die Kenntnisse der Temperatur-, Dichtigkeits- und Feuchtigkeitsverhältnisse sowie die Windströmungen in den oberen Luftschichten als unerlässliche Tatsachen dazugehörten. Frühzeitig wurden denn auch schon kühne Ballonfahrten zur Feststellung solcher Fakten unternommen, doch lieferten sie infolge der ständigen Veränderungen im weiten Luftmeer zu wenig sichere Resultate. Aus diesem Grunde fanden die Forscher, dass derartige Beobachtungen am ehesten auf isolierten Bergspitzen zu machen seien, wobei diese Spitzen nicht mit einer zu grossen Masse in die Atmosphäre hineinragen dürfen, weil sonst der Einfluss derselben auf die umgebende Luft zu gross ist und der dort gewählte Standort der Instrumente nicht die freie Atmosphäre repräsentieren kann.“





# Wetterwarte auf dem Säntis-Gipfel (2)



1879 tagte der internationale Meteorologenkongress in Rom. Neben vielen anderen Themen ging es auch um die Errichtung einer meteorologischen Beobachtungsstation auf einem Alpengipfel. Man erhoffte sich damit Einblicke in das Wettergeschehen in den höheren Sphären. Julius von Hann (1839-1921), Direktor der „k. k. Centralanstalt für Meteorologie und Erdmagnetismus“ in Wien, verfasste im Auftrag des Kongresses einen Bericht, in dem es u.a. hiess:

„Der Congress hält es bei dem gegenwärtigen Standpunkte der Meteorologie von besonderer Wichtigkeit, einige vollständig ausgerüstete Observatorien auf dominirenden Berggipfeln zu errichten und die Beobachtungen an denselben unverkürzt im Druck zu veröffentlichen, um sie allen Meteorologen zugänglich und sie zur Lösung aller auch etwa in Zukunft erst auftauchender Probleme nach Möglichkeit nutzbar zu machen [...] Der Congress hält die Gründung eines Gipfelobservatoriums in der Schweiz für besonders wünschenswert.“

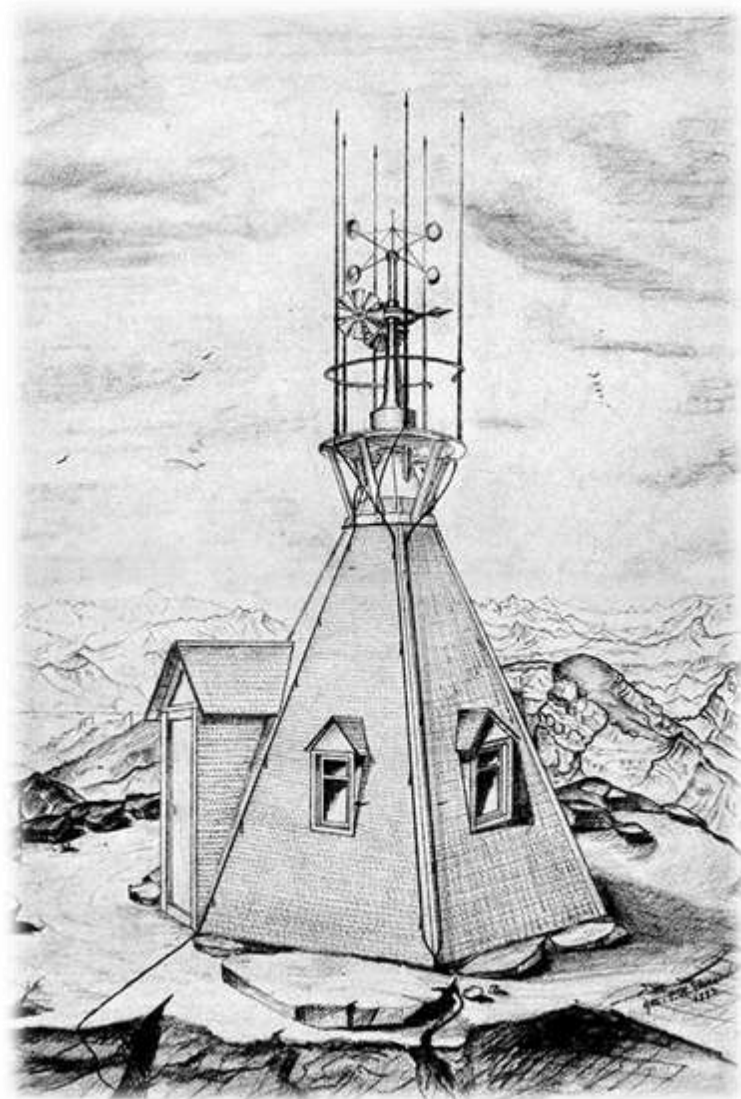
**Robert Billwiller** war von 1881 bis 1905 Direktor der Schweizerischen Meteorologischen Centralanstalt. Er studierte ab 1869 in Zürich, Göttingen und Leipzig Astronomie, Mathematik und Philosophie. Er betrieb die Einrichtung einer meteorologischen Station auf dem Säntis, verbesserte wesentlich das meteorologische Beobachtungsnetz der Schweiz durch telegrafische Meldungen und führte (zunächst privatim als „R.B.“, gegen die Mehrheit der Meteorologischen Kommission) Wetterprognosen ein.

# Wetterwarte auf dem Säntis-Gipfel (3)

In der Schweiz werden daraufhin frühere Überlegungen zu einem meteorologischen Bergobservatorium wieder aufgenommen. Robert Billwiller, der Direktor der Schweizerischen Meteorologischen Centralanstalt, berichtet 1884 rückblickend:

„Schon Anfangs der Sechziger Jahre, bei Organisation der meteorologischen Beobachtungen in der Schweiz durch die Naturforschende Gesellschaft, nahm die hierfür bestellte meteorologische Commission die Etablierung einer möglichst vollständigen, mit Registririnstrumenten auszurüstenden Bergstation in ihr Programm auf und es wurde dazu zunächst das Faulhorn, nachher das Gotthardospiz in Aussicht genommen. Allein Schwierigkeiten verschiedener Art, worunter hauptsächlich die grossen Kosten, hinderen die Ausführung des Projects.“

Nach dem Kongress in Rom qualifizierte man den Säntisgipfel als „...den für die Aufnahme einer meteorologischen Station am besten geeigneten, da er bei bedeutender Höhe so vollständig frei liegt, wie vielleicht kein zweiter in den Alpen und dabei verhältnissmässig leicht zugänglich ist. [...]



# Wetterwarte auf dem Säntis-Gipfel (4)

In einem ersten Voranschlag wurden die Kosten der Einrichtung der Station auf Fr. 5000, diejenigen der als durchaus nothwendig erachteten telegraphischen Verbindung auf Fr. 3000 und endlich die laufenden Betriebskosten der Station auf Fr. 6000 per annum veranschlagt. [...]

Die telegraphische Verbindung mit dem Thal wurde sowohl der Sicherheit der Station im Winter wegen, als auch um jederzeit die Correspondenz mit der meteorologischen Centralstation in Zürich ermöglichen zu können, als durchaus nothwendig erachtet. [...] Es waren hiebei nicht geringe Schwierigkeiten zu überwinden. Das Bohren der Löcher in das sehr harte Gestein bot besondere Hindernisse und das Ziehen des Drahtes von einem Stützpunkt zum andern, das Erklettern derselben war zum Theil mit Gefahr verbunden. [...] Mit Eintritt des Winters machte sich jedoch ein fataler Uebelstand bemerkbar, der darin bestand, dass im obern, dem Winde stark ausgesetzten Theil der Leitung, sich nicht nur starker Rauhfrost, sondern als Niederschlag aus der sehr feuchten und stark bewegten Luft enorme Eismassen an den Draht setzten, die zunächst eine Biegung der





# Wetterwarte auf dem Säntis-Gipfel (5)

eisernen Tragstangen, dann aber auch bei grossen Spannungen ein Zerreißen des ausserordentlich starken englischen Stahldrahtes von bester Qualität veranlasste.

Als eines der wichtigsten Instrumente war schon ganz Anfangs für die Säntisstation ein möglichst einfaches, sicher functionirendes und von dem Beobachter leicht zu bedienendes Anemometer in Aussicht genommen worden, welches auf der obersten Spitze des Berges postirt, das Verhalten des Windes sowohl nach Richtung als Intensität durch eine continuirliche Aufzeichnung beider Elemente zur Anschauung bringen sollte. [...] Für dieses Instrument war die Aufstellung auf der obersten Spitze (2504 Meter Meereshöhe nach trigonometrischen Messungen) des Säntis unerlässlich, denn nur so kann man annehmen den Windverhältnissen, wie sie sich in der freien Atmosphäre gestalten, annähernd beizukommen. Für die Unterbringung des Apparates konnte die vorhandene eiserne dreiseitige und sehr feste Signalpyramide von 4 Meter Höhe sehr vortheilhaft verwendet werden; dieselbe wurde s. Zeit von der Section St. Gallen des Alpenclubs errichtet und uns in verdankenswerthester Weise zur Benutzung überlassen.

Trotzdem ist es nicht möglich, den Apparat während des ganzen Jahres im Gang zu erhalten. Die Ansätze von Eis



# Wetterwarte auf dem Säntis-Gipfel (6)

an die äusseren Theile desselben, welche nun einmal schlechterdings dem Winde ausgesetzt werden müssen, wenn sie ihren eigentlichen Zweck erfüllen sollen, sind bei feuchten Westwinden und Temperaturen unter Null, also hauptsächlich im Winter, so enorm, dass der Gang des Schalenkreuzes und der Windflügelräder sehr erschwert oder geradezu ganz gehemmt wird und zur Vermeidung dieses Umstandes dürfte es kaum ein Mittel geben.

Die Auswahl einer geeigneten Persönlichkeit als Beobachter war keine leichte Sache. [...] Leute, die hierzu geeignet sind und sich entschliessen mindestens ein Jahr auf einem während des grössten Theils des Jahres isolirten Posten auszuhalten, sind nicht zahlreich.

Für die weitere Fortführung der Station wird ohne Zweifel der Bund in Anspruch genommen werden müssen. [...] Wir zweifeln nicht daran, dass die eidgenössischen Räte für dieses patriotische und zugleich wissenschaftliche Unternehmen von internationaler Bedeutung die erforderlichen Mittel bewilligen werden.“



# Wetterwarte auf dem Säntis-Gipfel (7)



<http://photobibliothek.ch/seite0071.html>

*Telefon und Morseapparat im Arbeitszimmer des Observatoriums.*

Der Säntisgipfel erweist sich aufgrund der Höhe (2503m) und der vorgelagerten Position nördlich des Alpenhauptkamms besonders geeignet für ein meteorologisches Bergobservatorium; es befindet sich auf dem Boden dreier Kantone (AI, AR, SG). Eine Herausforderung war 1882 das Erstellen der Telegrafenerleitung (mit 180 Masten von Weissbad über Wasserauen und die Meglisalp). Die Säntis-schwebbahn wurde übrigens erst 1935 eröffnet.

Die Arbeit für die Wetterbeobachter war im Winter oft „nur unter ganz entschiedener Lebensgefahr“ möglich, so Robert Billwiller. Am 25. Januar 1883 schrieb Wetterwart Koller in sein Tagebuch: „Übel erging es zwei Angestellten der Meteorologischen Zentralanstalt, die zwecks Messungen mit neuen Apparaten eingetroffen waren. Als sie anderntags in Begleitung zweier Säntisknechte zu Tale wollten, wurden sie auf dem Großen Schnee von einem derartigen Schneesturm überfallen, dass sie ihr letztes Stündlein gekommen glaubten. Unter äusserster Anstrengung langte die ganze Gesellschaft wieder im Gasthause und damit in der Wetterwarte an, wo sie volle vier Tage eingeschneit verblieben.“



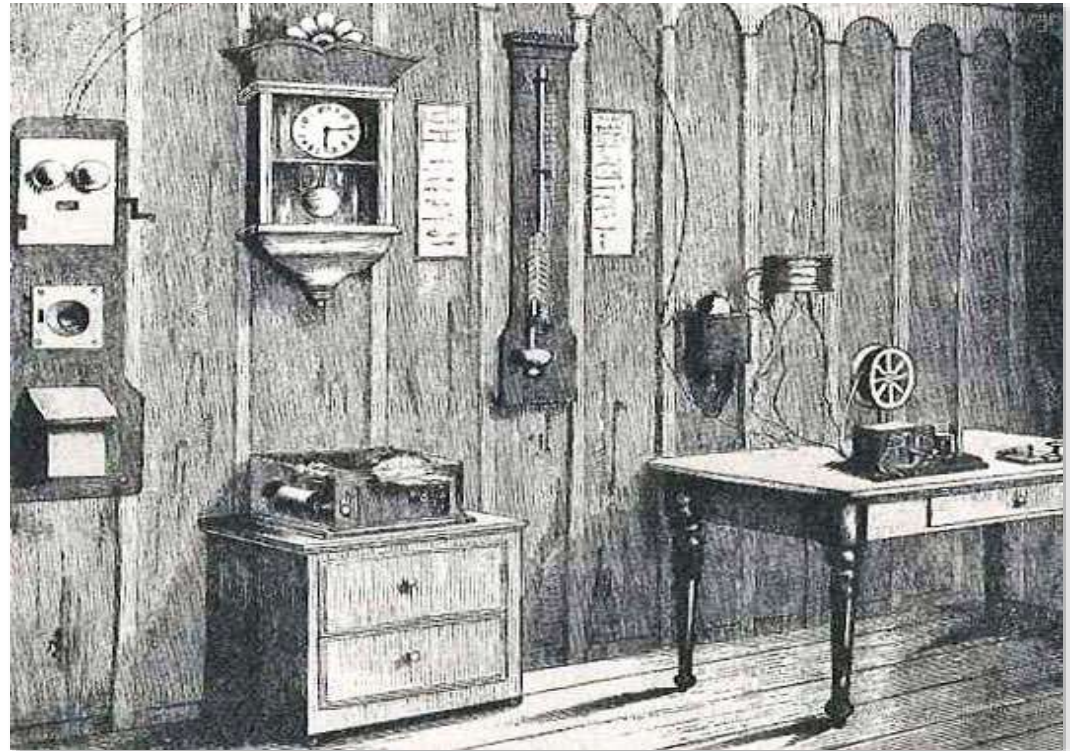
# Wetterwarte auf dem Säntis-Gipfel (8)

„Zehn vollamtliche Säntisbeobachter, mehrheitlich mit ihren Ehegattinnen, haben von 1882 bis 1969 ihre anspruchsvolle Aufgabe immer wieder auch unter schwierigsten Wetterbedingungen wahrgenommen. Kennzeichnend waren wochenlange Einsamkeit mit zeitweise fehlendem Nahrungsmittelnachschub im Winter (bis 1935), stundenlange Enteisungsaktionen vor allem am Windmesser, ermüdendes Schneeschaufeln, Reparieren von Instrumenten.“ [Thomas Gutermann, Mitteilungen der Deutschen Meteorol. Gesellschaft 4/2000]



<http://photobibliothek.ch/seite0071.html>

*Der Wetterwart hatte täglich dafür zu sorgen, dass sich das Windmesser-rad frei drehen kann und nicht vereist.*



[www.wettersaeulen-in-europa.de/direct.htm?/saentis/saentis.htm](http://www.wettersaeulen-in-europa.de/direct.htm?/saentis/saentis.htm)

# Wetterwarte auf dem Säntis-Gipfel (9)



[www.wettersaeulen-in-europa.de/direct.htm?/saentis/saentis.htm](http://www.wettersaeulen-in-europa.de/direct.htm?/saentis/saentis.htm)

# Wetterwarte auf dem Säntis-Gipfel (10)



<http://photobibliothek.ch/seite0071.html>

Hermann Grosser schrieb 1974 im „Appenzeller Kalender“: „Benötigte der Beobachter Lebensmittel oder andere Materialien, so hatte sein Träger den Weg möglichst bald und oft ungeachtet der herrschenden Verhältnisse unter die Füße zu nehmen. Die Lasten hatten je nach Umständen ein Gewicht von 30 bis 100 und mehr Kilo. Manchmal wandte sich das Wetter in der Zeit vom Weggang bis zur Ankunft auf dem Gipfel zum Guten und die Tour wurde sogar zum Genuß, andere Male aber schlug es um und brachte den Säntisträger bis nahe ans Ende seiner Kräfte, so daß er sich nach seiner Ankunft beim Wetterwart zuerst richtig erholen und auch besseres Wetter abwarten mußte, bis er wieder zu Tal gehen konnte.“

Mehrere Säntisträger fanden bei ihrer äusserst beschwerlichen und gefährlichen Arbeit den Tod durch Abstürze oder Lawinen. Pro Zentner Traggewicht erhielten sie sechs Franken Lohn. Teilweise wurden Maultiere eingesetzt, oft – insbesondere im Winter – erfolgte der Warentransport aber zu Fuss. Nach der Eröffnung der Säntis-schwebbahn 1935 wurde die Tätigkeit eingestellt.

*Säntisträger brachten Brennholz und Essen zum Gipfel.*



# Wetterwarte auf dem Säntis-Gipfel (11)



[www.altersaentis.ch/fileadmin/\\_processed\\_/csm\\_geschichte\\_4\\_03\\_c0d52f3cba.jpg](http://www.altersaentis.ch/fileadmin/_processed_/csm_geschichte_4_03_c0d52f3cba.jpg)

„Doppelmord auf dem Säntis 1922 – Als der Kontakt zum Wetterwart-Ehepaar Heinrich und Lena Haas auf dem Säntis am Dienstag, 21. Februar 1922 unterbrochen wurde, hätte sich deswegen kaum jemand grosse Sorgen gemacht, denn die Telegraf- und Telefonleitung war immer wieder einmal durch Schneelast und Wind beschädigt worden. Eher besorgniserregend war, dass sich Frau Haas am Sonntag bei der Frau des Säntisträgers Rusch über einen ungebetenen Gast beschwert hatte.“ So beginnt die Schilderung des Kriminalfalls, der als Drehbuch für einen „Tatort“-TV-Film erhalten könnte. Weiterlesen z.B. bei <https://photobibliothek.ch/seite0071.html>



<http://photobibliothek.ch/seite0071.html>

# 1935: Osservatorio Ticinese in Locarno-Monti



*La vecchia sala delle previsioni dell'Osservatorio di Locarno-Monti.*

In der den Annalen der „Schweizerischen Meteorologischen Zentral-Anstalt“ von 1935 heisst es, „dass der Alpenwall eine ganz wesentliche Scheidewand bildet für Gestaltung und Ablauf der atmosphärischen Zustände und Vorgänge. Die Süd-schweiz hat in dieser Hinsicht grundsätzlich andere Verhältnisse als die anderen Landesteile, und es war notwendig und gerechtfertigt, dem durch besondere Massnahmen Rechnung zu tragen“. Dies führte zur Einrichtung des Osservatorio Ticinese als regionales Prognosezentrum.



*La sala previsione Locarno-Monti 2015.*



# Swissair-Piloten beim Wetterbriefing (1940er-Jahre)





# Wetterbericht der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt in Zürich, 16. Februar 1962

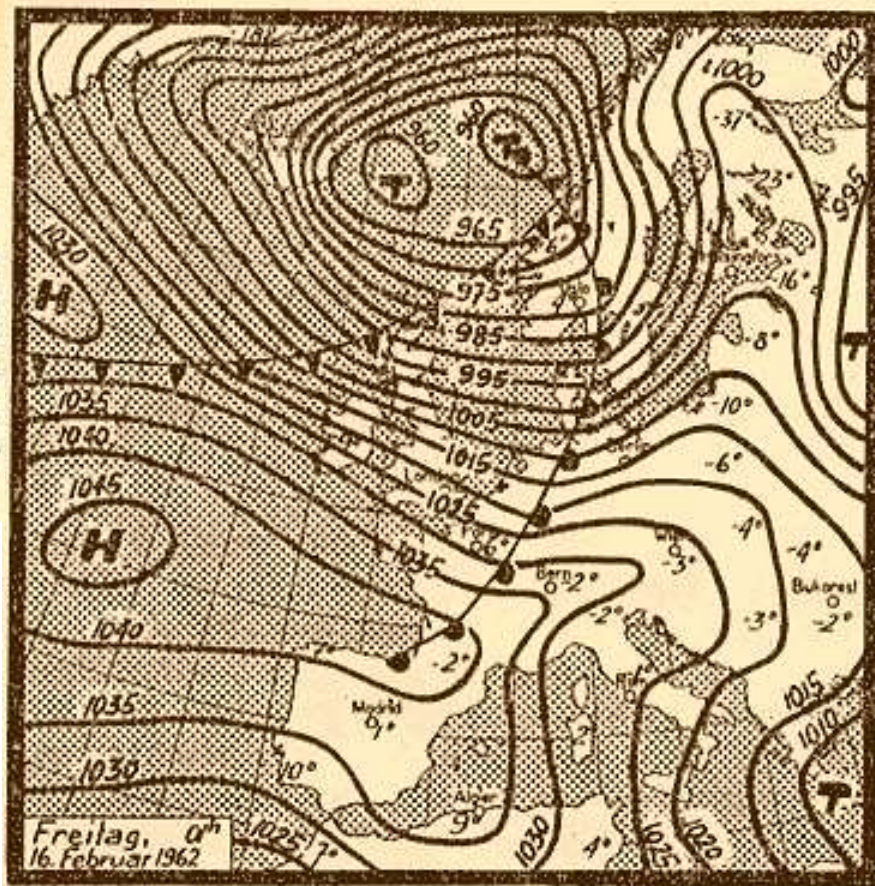
## Wetterberichte

Bericht der Schweiz. Meteorolog. Zentralanstalt

Freitag, 16. Februar

**Allgemeine Wetterlage:** Das Tief, das gestern bei Island lag, hat sich zu einem Sturmtief entwickelt und heute morgen die norwegische Küste erreicht. Auf seiner Südflanke wird Mitteleuropa heute von milder Meeresluft überflutet. In der kommenden Nacht werden kältere Luftmassen von Nordwesten her in unser Land eindringen. Das Wetter bleibt unbeständig.

**Hamburger Sturmflut, Fr 16./Sa 17. Feb 1962:** Ein Sturmtief verursachte an den Unterläufen von Elbe und Weser höchste, vorher nicht beobachtete, Pegelstände, was zahlreiche Deichbrüche zur Folge hatte. Allein in Hamburg kam es zu 315 Toten. In den Niederlanden gab es erst wenige Jahre zuvor, 1953, eine verheerende Sturmflut: Die Niederländer feierten den 15. Geburtstag von Prinzessin Beatrix und merkten lange nichts. Um drei Uhr morgens brachen die ersten Deiche, 1835 Menschen ertranken.



# Die Hamburger Sturmflut von 1962

Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 fand in einer Zeit statt, in der die **moderne Informationstechnologie** wie auch die Methodik der Wasserstands- und Wettervorhersage **in den Kinderschuhen steckte**. Es gab keine Wettersatelliten, die für die Wasserstands- und Wettervorhersage zuständigen Stellen arbeiteten auf nationaler Ebene, eine internationale Vernetzung war nur rudimentär vorhanden. Plötzlich eintretende Wetterverschlechterungen konnten so teilweise erst erkannt werden, wenn es für eine rechtzeitige Warnung schon zu spät war. Als **Kommunikationsmittel** standen **analoge Technologien** in Form von Telefon, Fernschreiber und Funk zur Verfügung. Als Bindeglied zwischen den Behörden und der Bevölkerung dienten Aushänge, Tageszeitungen, Luftschuttsirenen sowie Lautsprecherwagen von Polizei und Feuerwehr. Fernsehen und Rundfunk sendeten nur eingeschränkt für einige Stunden am Tag.

Am 16. Februar erreichte ein Tief bei Island die mittelnorwegische Küste im Raum Trondheim und zog anschliessend in südöstlicher Richtung. In den Abendstunden des 16. Februars 1962 bildete das weit nach Norden vorgeschobene Azorenhoch einen kräftigen Keil über den Britischen Inseln, so dass die Seegebiete der Nordsee unter den Einfluss von **immer schärfer ausgeprägten Luftdruckgradienten** gerieten.

Auf Grund des seit den Abendstunden des 15. Februars stark auffrischenden Windes waren an den Pegeln im gesamten Nordseeküstenbereich sowie in den Flüssen bereits bei der Tide am Mittag des 16. Februars deutlich erhöhte





# Die Hamburger Sturmflut von 1962 (2)

Werte von etwa **2 Metern über dem vorausberechneten Tidehochwasser** festzustellen. Mit der sich weiter verschlechternden Wetterlage und der Drehung des Windes auf Nordwest wurde ein **Ablaufen der mittäglichen Haupttide weitgehend gebremst**. Mit Wiederauflaufen der Flut wurde ein rasches und sehr starkes Ansteigen der Wasserstände beobachtet. Gegen 21 Uhr kam es an den Seedeichen sowie auf den Ostfriesischen Inseln bereits zu sehr kritischen Situationen. Dem Nachthochwasser folgte am Mittag des 17. Februars eine ausserordentlich hohe Nachttide, bei der sich zwar keine Rekordwerte mehr einstellten, die jedoch insbesondere im Hamburger Raum weitere Wassermassen durch die noch nicht geschlossenen Deichbrüche in die Überflutungsgebiete einströmen liess und die Rettungs- und Bergungsarbeiten dort massiv behinderte. Die Deiche wiesen schwere bis schwerste Schäden durch Ausschläge an den Aussenböschungen sowie Abrutschungen der Binnenböschungen auf. In Schleswig-Holstein wurden insgesamt mehrere tausend Menschen evakuiert.



In Hamburg war es infolge massiver **Störungen der Kommunikationsverbindungen** nicht möglich, genaue Hinweise über das Ausmass der Katastrophe zu bekommen und Rettungs- und Evakuierungsmassnahmen noch während der Katastrophe in koordinierter Form durchzuführen. Ebenso wenig war es den Hamburger Behörden möglich, genauere Informationen aus den elbabwärts gelegenen Regionen, insbesondere aus Cuxhaven zu erhalten, da die **Fernsprechverbindungen** nicht nur gestört, sondern auch nach einigen grossen Deichbrüchen **zerstört** waren.

Nachdem in Hamburg die Gefährlichkeit der Lage bis in die späten Abendstunden seitens der Behörden verkannt und dringende Warnungen aus den Küstenorten nicht ernst genommen worden waren, verloren die zuständigen Behörden aus Polizei und Feuerwehr nach dem **Zusammenbruch aller Telefon- und Verkehrsver-**



# Die Hamburger Sturmflut von 1962 (3)

bindungen ab Mitternacht vollständig den Überblick über die tatsächliche Lage. Eine Warnung der Bevölkerung in den bedrohten Kleingartengebieten fand entweder nur unzureichend durch vereinzelte Polizeibeamte oder überhaupt nicht statt. Eine Unterbrechung der bei der Bevölkerung damals beliebten Fernsehserie Familie Hesselbach war nicht möglich, sodass die Warnung erst im Anschluss ausgestrahlt werden konnte, als die Menschen in den gefährdeten Gebieten längst im Bett waren.

Eine zentrale Koordination des Rettungseinsatzes war nicht möglich bis zum Erscheinen des damaligen Innensenators **Helmut Schmidt**, der ab dem Morgen des 17. Februars die zentrale Einsatzleitung für das Hamburger Stadtgebiet übernahm und sich nach Feststellung des Bestehens eines katastrophalen allgemeinen Notstands selbst mit weitreichenden Vollmachten versah. Da Schmidt zuvor als Abgeordneter des Bundestages mit Verteidigungsangelegenheiten befasst war und die meisten Kommandierenden der NATO persönlich kannte, konnte er noch am Morgen des 17. Februar, obwohl verfassungsrechtlich nicht dazu befugt, NATO-Streitkräfte und hier insbesondere Pioniertruppen mit Sturmbooten sowie 100 Hubschrauber der Bundeswehr und der Royal Air Force anfordern. Er habe, so erklärte Schmidt später, seiner Heimatstadt helfen wollen, ohne vorher im Grundgesetz über seine Kompetenzen nachgeschaut zu haben. Sein energisches Krisenmanagement machte Schmidt bundesweit bekannt; es war die Grundlage einer Politikerkarriere, die in Schmidts Amtszeit als **Bundeskanzler von 1974 bis 1982** gipfelte.



Als Folge der Sturmflut waren alleine **in Hamburg 315 Tote, 20000 Obdachlose und 6000 zerstörte Gebäude** zu beklagen; ferner verendeten tausende Rinder, Schweine und Pferde. [de.wikipedia.org/wiki/Sturmflut\_1962, gekürzt]

# Die Hamburger Sturmflut von 1962 (4)

Die Wochenzeitschrift „Der Spiegel“ schilderte am 28.2.1962 unter der Überschrift „Stadt unter“ das Geschehen so, wobei sich die **Interdependenzen kritischer Infrastrukturen** schon damals problematisch erwiesen:

„[...] Über die Wohngebiete im Urstromtal der Elbe kam mit der Flut das Chaos. Schon kurz nach den ersten Wassereinbrüchen **versagte die Telefonverbindung**. Kabelschächte und die mit hochempfindlichem Gerät bestückten Vermittlungsstellen sofften ab. Aus den Katastrophengebieten kam bald keine telephonische Nachricht mehr nach draußen. Als dann die Stromversorgung ausfiel, brach auch das übrige Telephonnetz abschnittsweise zusammen: Die Post schaltete auf eigene Not-Aggregate um, die nur noch eine begrenzte Zeit lang Strom für die intakten Leitungen lieferten. [...] Vier Kraftwerke wurden überflutet, ein weiteres beschädigt. Damit waren rund vier Fünftel der Gesamtkapazität ausgefallen. Die angeforderte Stromlieferung über das Verbundnetz brachte in diesen entscheidenden Stunden keine Hilfe. Durch den Sturm führte die Luft einen hohen Salzgehalt. Das Salz kristallisierte sich auf den Isolatoren der Überlandleitungen, es kam zu Funkenüberschlägen, die Spannung fiel zusammen. Die Stadt war ohne Licht und Energie. **Der Stromausfall legte die Wasser- und Gaswerke lahm**, soweit sie nicht ohnehin überflutet waren; ohne Strom konnten die Pumpen weder Wasser noch Gas durch die Leitungen drücken. [...]

Im Westen des Stadtteils Wilhelmsburg lief das Wasser sacht gurgelnd in die Wohnungen und füllte sie. Von Norden dagegen schlug die Flutwelle mit Wucht zwischen die Behausungen, sprengte Fenster, Türen und Wände und wirbelte die Gartenhäuschen wie Apfelsinenkisten davon. Eine nahe der Deichbruchstelle am Spreehafen gelegene Siedlung wurde auf diese Weise zermalmt. Überlebende hockten noch bis in die Morgenstunden auf schaukelnden Trümmern, schrien um Hilfe und gaben Blinkzeichen. Andere erblickten das Licht des neuen Tages nicht mehr; starben vor Erschöpfung oder ertranken. [...] Viele Bewohner flacher Gebäude wurden bei dem Versuch, sich noch auf die Straße zu retten, von der Flutwelle in den eige-



# Die Hamburger Sturmflut von 1962 (5)

nen Keller gestoßen und dort ertränkt. [...] Die Menschen krallten sich an Dächern und Schornsteinen fest, andere vermochten sich auf Bäume zu retten. Für manchen war es nur eine Galgenfrist [...] Als einziges rettete ein ehemaliger Bewohner der Schreberkolonie 'Gartenfreunde' die Puppe seiner Tochter. Frau, zwei Kinder, Bruder und Schwägerin waren im Haus ertrunken. [...]"

Raymond Ley gibt in seinem Begleitbuch „Die Nacht der großen Flut“ (Ellert & Richter Verlag, Hamburg, 2006) zum gleichnamigen Fernsehfilm einige Gespräche mit [Zeitzeugen](#) wieder. Gerda Brandt (Jg. 1930), die die Flut in einer Gartensiedlung in Hamburg-Niedergeorgswerder auf der Elbinsel Wilhelmsburg erlebte, beschrieb die Flutnacht so:

„Ich erinnere mich, dass, bevor das Fernsehprogramm zu Ende war, da ein Band durchlief: Schwere Sturmflut an der Nordsee erwartet. Aber die Nordsee und die Küste, die ist weit. Wir sind dann in aller Ruhe ins Bett gegangen, an den Sturm und das Getöse hatten wir uns gewöhnt, das war nicht weiter schlimm.

[...] Dann sind wir in der Nacht wach geworden, weil meine Eltern kamen. Die haben an die Tür geklopft und gesagt: 'Ihr müsst aufstehen, Ihr müsst aufstehen, das Wasser kommt', und ich habe das gar nicht ernst genommen. [...] Wir mussten ja denn den Jungen wecken und ich musste das Mädchen aus dem Bettchen holen und ich hörte, wie an einer Ecke im Haus das Wasser gluckerte. Da hatte ich Angst bekommen. Das Anziehen selber war keine Schwierigkeit. Wir waren noch von den Bombenangriffen und von den vielen Alarmen geübt, unser Zeug blitzschnell anzuziehen. Das habe ich auch meinem Sohn beigebracht. Die Deern hatte ich in ihre Bettdecke gewickelt und in den Kinderwagen, und da habe ich meine Geldkassette noch reingeschmissen – da in der Geldkassette, da lag





# Die Hamburger Sturmflut von 1962 (6)

das Geld schon für das neue Schlafzimmer drin – und ja, ich glaub noch ein Paket Zwieback. Das ging ja alles so schnell. Mein Schwiegervater ist zu der Tante meines Mannes gelaufen und hat versucht, sie zu wecken und hat gegen das Schlafzimmer geklopft, geballert und gerufen, sie hat aber nicht reagiert. Er kam denn rüber und sagte: ‘Tante Erna, die krieg ich nicht wach, die ist wohl nicht da’. [...] Dann rauf aufs Dach und ja, da hat mein Mann mir denn erst mal raufgeholfen. Er hat denn den Kinderwagen raufgereicht oder wir haben erst den Jungen hochgeschickt, das weiß ich auch nicht, das ging blitzschnell. Wir drei waren die ersten auf dem Dach, meine Kinder und ich. Ich weiß nicht, ob ich meinen Eltern noch geholfen hab, da noch raufzukrabbeln – da bekam ich Panik. Ich weiß nur, dass mein Sohn und ich uns hingehockt haben auf dem Dach und jeder von uns hat eine Hand für den Kinderwagen gehabt, weil wir Angst hatten, dass der Sturm uns den sonst vom Dach weht. [...]

Wir haben alle auf dem Dach gesessen, um auch wenig Windwiderstand zu geben. Und dann stieg das Wasser und plötzlich fing drüben meine Tante an zu schreien. Im Nachhinein haben wir uns das so gedacht, dass sie wohl erst spät nach Hause gekommen ist, Feuer in der Küche gemacht und sich dort auf der Couch schlafen gelegt hat, weil das Schlafzimmer zu kalt war, und dadurch hat sie das Klopfen nicht gehört. Wir konnten sie sehen. Das heißt, ich habe mich nicht weggerührt vom Kinderwagen und meinem Jungen, aber mein Mann wird sie gesehen haben. Erst waren es ganz normale Hilferufe, aber nachher, als das Wasser immer höher stieg, da hast sie fürchterlich geschrien und immer verzweifelter, und ein Nachbar, der bei uns mit auf dem Dach war, der hat sich auf das Dach gekniet und hat das Vaterunser gegen den Wind geschrien, bis sie tot war, bis das Wasser ihr in den Hals gelaufen ist.“



# Die Hamburger Sturmflut von 1962 (7)

Drastisch, mit einem fast abfällige Vergleich mit 'Hinterindien' und einem 'Pfahldorf der Primitiven', resümierte „Der Spiegel“ [9/1962] die schockhafte Erfahrung der **Verletzbarkeit der technischen Infrastruktur und Zivilisation**:

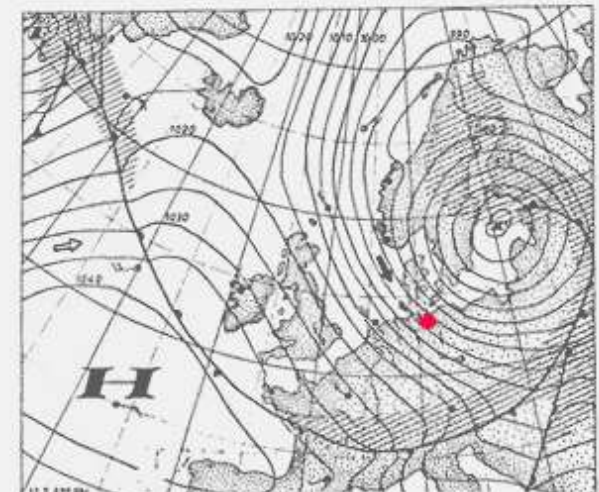
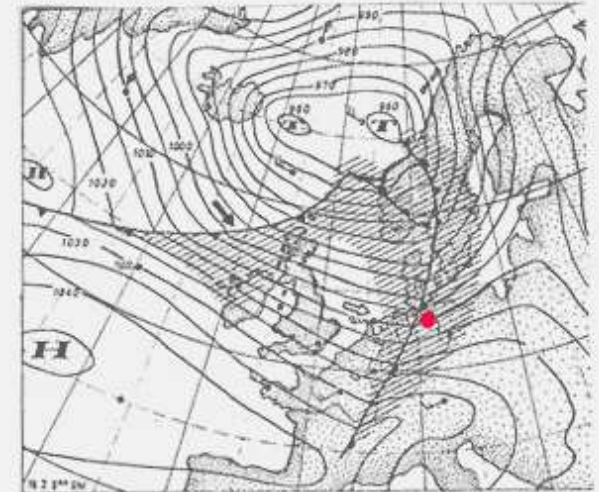
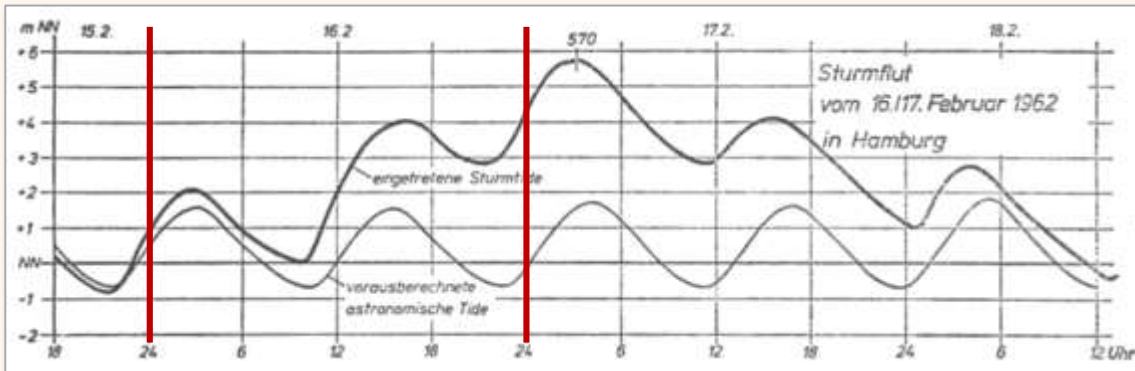
„Am 16. Februar 1962 ertrank im Nachhochwasser der Nordsee der Glaube an die Sekurität, die sich als wasserlöslich erwies. Nicht weil die Deiche an 63 Stellen brachen und etliche, die nicht brachen, glatt überspült wurden, sondern weil ein Spuk über Land kroch, den man zwar noch in Hinterindien, nicht aber an der Elbe vermutet hatte: Eine **moderne Weltstadt**, 750 Quadratkilometer groß und musterhaft organisiert, **eine Festung** aus Menschen, Beton und Energie zeigte sich gegen ein 100 Kilometer entferntes Randmeer des Ozeans **so anfällig wie ein Pfahldorf der Primitiven**.“







[www.flickr.com/photos/152629780@N02/28316767518/](http://www.flickr.com/photos/152629780@N02/28316767518/)



Wetterkarten vom 16. und 17. Februar 1962  
MEZ 00 Uhr

Voraussetzung für das Auftreten hoher Sturmfluten im Bereich der Elbe sind ausgedehnte Tiefdruckgebiete, die von Island über die Nordsee nach Osten ziehen. Wasser wird dann aus der Nordsee flussaufwärts in die Elbe gedrückt. 1962 wurde die Elbe bei Wind zunächst aus SW bis W, dann auf WNW drehend und bis Stärke 9 Bft zunehmend, im Verlaufe von drei Tiden langsam bis zum Sturmflutscheitel (+ 5.70m NN) gefüllt.



# Wettervorhersage im Fernsehen



# Wettervorhersage im Fernsehen (1951)

Meteorologen in Anzug und Krawatte erklären live mit Kohlestift und grossen Gesten dem abendlichen Fernsehpublikum das Wetter.



# Wettervorhersage im Fernsehen (1968)

Meteorologin Dr. [Karla Wege](#) wird 1968 die erste Frau im Team mit acht männlichen Kollegen beim „Zweiten Deutschen Fernsehen“ (ZDF).





# Wettervorhersage im Fernsehen (1968)



Ein typisches Fernsehbild mit Dr. Karla Wege sah damals allerdings eher so aus.

Flimmern, Rauschen („Schnee“), Echos („Geisterbilder“) oder über das Bild wandernde Streifen waren bei analogen Röhengeräten mit Empfang über Antenne nicht ungewöhnlich. Auch Kontrast, Bildschärfe und Auflösung waren noch bescheiden.

# Wettervorhersage im Fernsehen (USA)



Im kommerziellen amerikanischen Fernsehen gab es früher als in Europa Ansätze, die Wettervorhersage „ansprechend“ zu präsentieren – Schauspielerinnen statt Experten.

Der spätere Filmstar Janice („Jan“) O'Dell war Ende der 1950er-Jahre das „Channel 9 Weather Girl“. Noch im Jahr 2001 arbeitete sie als „senior model“ für Reklame-Anzeigen zu medizinischen Produkten. Sie erlebte dabei den Angriff auf das World Trade Center in New York: „I was unfortunate enough to live next to the WTC on 9/11/2001. I was leaving my building, a block away from the site, when the South Tower collapsed. Hit by falling debris, I ended up with traumatic brain injury plus general bodily injuries and years of recovery... No more modeling“.

# Wettervorhersage im Fernsehen (USA)



Lola Hall auf KWTU,  
ca. 1956.

Wenn die Wettervorhersage hinter einer Plexiglasscheibe präsentiert wird, muss man mit einem Fettstift „rückwärts“, also in Spiegelschrift, schreiben. Und zwar live. Lola Hall macht das mit links.



# Animierte Wetterkarten in den 1960er-Jahren



„Automatisches Wetter“ mit **Zeichen-trickfilmtechnik** (jeweils rund 35 Meter Film aus ca. 4000 Einzelbildern, produziert in 3 Stunden) – Computergraphik und Computeranimation oder Satellitenbilder gab es noch nicht. (Die Karte zeigt Deutschland noch „dreigeteilt“, in den Grenzen von 1937 – Westdeutschland, Ostdeutschland bzw. „DDR“ sowie Pommern und Schlesien „unter polnischer Verwaltung“.)

[www.hans-bredow-institut.de/files/fgrn/Elfriede%20Zechner.%20HR.JPG](http://www.hans-bredow-institut.de/files/fgrn/Elfriede%20Zechner.%20HR.JPG)

# Die Arbeit der Meteorologen ohne Computer

Der Meteorologe Winhart Edelmann berichtete, wie vor dem Einsatz von Computern eine Wettervorhersage zustande kam:

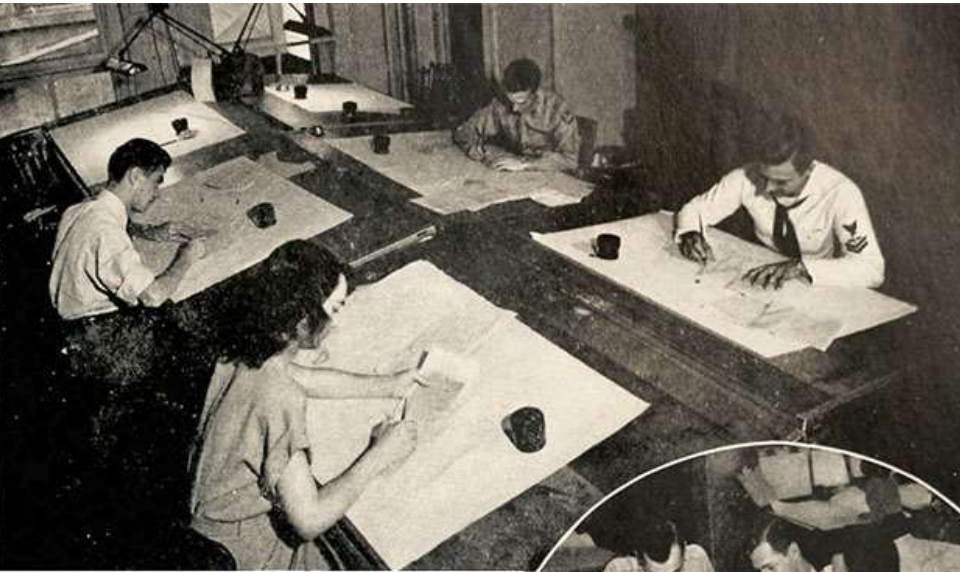
Ein erfahrener Beobachter konnte aus den Zeichen am Himmel das Wetter für die nächsten Stunden mutmassen. Das realistische Ziel des Meteorologen war eine bessere Vorhersage für den kommenden Tag. Dazu braucht er aus einer weiten Umgebung gleichzeitige Beobachtungen von Luftdruck, Wind, Temperatur, Feuchte, Wolken und Wetter. [...]

Alle Messungen und sonstigen Beobachtungen werden umgehend in einen Zahlencode verschlüsselt und über Funk verbreitet. Technisch gesehen war damals das Zeitalter des Kopfhörers. Stundenlang das Piepen der Morsezeichen im Ohr endlose Zahlenkolonnen zu schreiben: man kann sich schwer eine monotonere Arbeit vorstellen, die gleichzeitig höchste Konzentration erfordert. Wesentlich anregender, obgleich unter grossem Zeitdruck, war das nachfolgende Entschlüsseln und Einzeichnen der Beobachtungen in die Wetterkarte.

Nun kommt die Stunde des Meteorologen. Aus der Zusammenschau der gleichzeitigen Beobachtungen, der „Synoptik“, analysiert er die Lage der Hochs, Tiefs und Schlechtwetterfronten. Dann stellt er fest, wie sich diese Gebilde in den letzten Stunden bewegt und verändert haben. Schliesslich versucht er zu extrapolieren, wies sie sich wohl weiter bewegen könnten. In der Natur geht es dabei durchaus nicht geradlinig zu. Tiefs können Haken schlagen, sich beschleunigen oder liegen bleiben, aufspalten oder miteinander verschmelzen, verstärken oder verschwinden. So wurde ziemlich grob und mit häufigen Irrtümern eine Vorhersagekarte konstruiert, welche zeigt, von woher wir das Wetter von morgen importieren werden. Alles dies war solide Handarbeit.

Die synoptische Vorhersagemethode erreichte in den 1950er-Jahren ihren Gipfel und ihre Grenzen. Mehr war so nicht herauszuholen. Der Meteorologe hatte ausser unscharfen Regeln noch viel Spielraum für seinen fehlbaren Instinkt. Auf die Dauer konnte das nicht befriedigen.

# Die Arbeit der Meteorologen ohne Computer (1947)



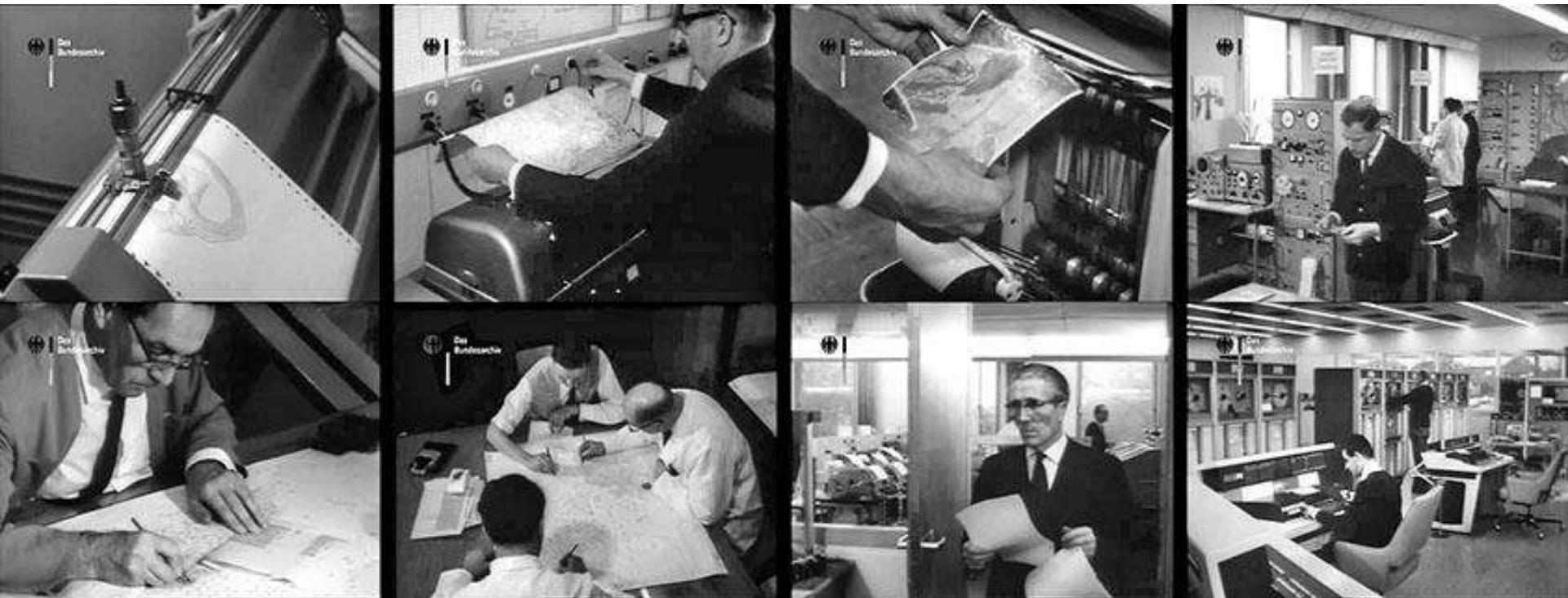
As the weather data become available, they are given immediately to a group of plotters whose job it is to enter the data on a large-scale chart so that they may be more comprehensively understood in the later stages of weather analysis. The work is subdivided among several plotters so that several sections of the country are being plotted at the same time. As fast as these sections are completed, they are passed to a group of weather analysts. The job of these analysts is to convert the data on the chart sections into those strange, wandering lines known as isobars. Other information interpreted by the analysts is the location of so-called fronts — the boundary areas between large masses of warm and cold air. By comparison with earlier charts, the analyst is able to show the direction of movement of the fronts. Such analyses, particularly of surface weather observations, are no mere matter of routine drafting. Many local conditions — the nature of the surrounding terrain, hills or mountains, rivers or other large bodies of water, other topographical conditions — can influence the recordings at any single point and it takes a trained and skillful analyst to interpret the data correctly. H. Stommel is here shown working on a prognostic chart which will go out over the facsimile network.

available, they are given immediately to a group to enter the data on a large-scale chart so that they may be more comprehensively understood in the later stages of weather analysis. The work is subdivided among several plotters so that several sections of the country are being plotted at the same time. As fast as these sections are completed, they are passed to a group of weather analysts. The job of these analysts is to convert the data on the chart sections into those strange, wandering lines known as isobars. Other information interpreted by the analysts is the location of so-called fronts — the boundary areas between large masses of warm and cold air. By comparison with earlier charts, the analyst is able to show the direction of movement of the fronts. Such analyses, particularly of surface weather observations, are no mere matter of routine drafting. Many local conditions — the nature of the surrounding terrain, hills or mountains, rivers or other large bodies of water, other topographical conditions — can influence the recordings at any single point and it takes a trained and skillful analyst to interpret the data correctly. H. Stommel is here shown working on a prognostic chart which will go out over the facsimile network.



# Die Arbeit der Meteorologen 1967: mit Computer

Die deutsche Kinowochenschau vom 29.06.1967 (Deutschlandspiegel 153) zeigt die seinerzeit zum Einsatz kommende Technologie (ratternde Fernschreiber, Satellitenfotos aus dem All, erste Computer) und die damals noch nötige Handarbeit beim Zeichnen der Wetterkarten beim Zentralamt des deutschen Wetterdienstes in Offenbach bei Frankfurt am Main: [www.filmothek.bundesarchiv.de/video/589692](http://www.filmothek.bundesarchiv.de/video/589692), Minute 8:14 bis Minute 11:00.



Die Verwendung von Computer(modellen) in der Meteorologie ist aber eine eigene Story... →

# Der Weg zur numerischen Wetterprognose

Vor dem Einsatz von Computern in der Wettervorhersage war die Meteorologie, insbesondere die Prognose, auf das Erfahrungswissen von Wetterbeobachtern angewiesen. Meteorologie war, wie Claus Pias schreibt, „**eher eine Kunst denn eine Wissenschaft**“. Die einlaufenden Daten der Beobachtungsstationen wurden aufgenommen und kartographisch verzeichnet, um anschließend Luftmassen zu identifizieren, nach persönlicher Erfahrung Isobare und Isotherme einzutragen und dann in einem Bildvergleich mit gespeicherten Karten ähnliche historische Wetterlagen aufzufinden und daraus — unterstützt durch Faustregeln — Prognosen zu erstellen.“

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts kannte man die für die Wetterentwicklung relevanten physikalischen Gesetze der Hydro- und Thermodynamik, hatte sie aber noch nicht kohärent zur Anwendung für ein grossräumiges Phänomen wie das Wetter gebracht. Um 1890 erkannte der amerikanische Astronom und Meteorologe **Cleveland Abbe** (1838 – 1916) „There is a physical basis for all meteorological phenomena. There are laws of mechanics and heat that apply to the atmosphere [...]. Meteorology is essentially the application of hydrodynamics and thermodynamics to the atmosphere“. In seinem Aufsatz „The physical basis of long-range weather forecasts“ von 1902 schlug er einen mathematischen Ansatz für die Vorhersage vor und drückte seine Hoffnung aus, dass Atmosphärenphysiker „take up our problems in earnest and devise either graphical, analytical, or numerical methods“, um die Gleichungen zu lösen – „then we shall be justified in calling our work rational science, as distinguished from empirical science.“ Aber es war ihm auch bewusst, dass dies eine gewaltige Aufgabe darstellt und Zeit erfordert: „First of all, it is absolutely necessary to take into consideration the condition of affairs over the whole earth; second, it is equally necessary to consider the conditions prevailing up to a very considerable height in the atmosphere; third, we must apply physical laws and not empirical rules. [...] I recognize the fact that we must not expect to realize these hopes in this generation. The progress of all science is necessarily slow.“

# Der Weg zur numerischen Wetterprognose (2)

Eine wissenschaftlich präzisere Analyse des Vorhersageproblems wurde kurz darauf von **Vilhelm Bjerknes** (1862–1951) unternommen, seinerzeit Professor in Stockholm und späterer Lehrstuhlinhaber für Geophysik in Leipzig. (Sein Vater war bereits Mathematiker und Physiker, Experte auf dem Gebiet der Fluidodynamik, und sein Sohn Jacob wurde später ebenfalls ein bekannter Meteorologe in Norwegen und den USA.) Ebenso wie für Cleveland Abbe bestand auch für Vilhelm Bjerknes das Ziel darin, die Meteorologie zu einer exakten Wissenschaft im Sinne einer angewandten Atmosphärenphysik zu machen. Er veröffentlichte 1904 in der „Meteorologischen Zeitschrift“ einen Aufsatz „Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik“. In diesem Artikel formulierte er sein später als „Meteorological Manifesto“ berühmt gewordenes Programm so:

„...dass die notwendigen und hinreichenden Bedingungen für eine rationelle Lösung des Prognoseproblems der Meteorologie die folgenden sind:

1. Man muss mit hinreichender Genauigkeit den Zustand der Atmosphäre zu einer gewissen Zeit kennen.
2. Man muss mit hinreichender Genauigkeit die Gesetze kennen, nach denen sich der eine atmosphärische Zustand aus dem anderen entwickelt.

[...] Der Zustand der Atmosphäre zu einer beliebigen Zeit wird in meteorologischer Hinsicht bestimmt sein, wenn wir zu dieser Zeit zu jedem Punkt die Geschwindigkeit, die Dichte, den Druck, die Temperatur und die Feuchtigkeit der Luft berechnen können.“



Vilhelm Bjerknes in Bergen (Rolf Groven, 1983)



# Der Weg zur numerischen Wetterprognose (3)

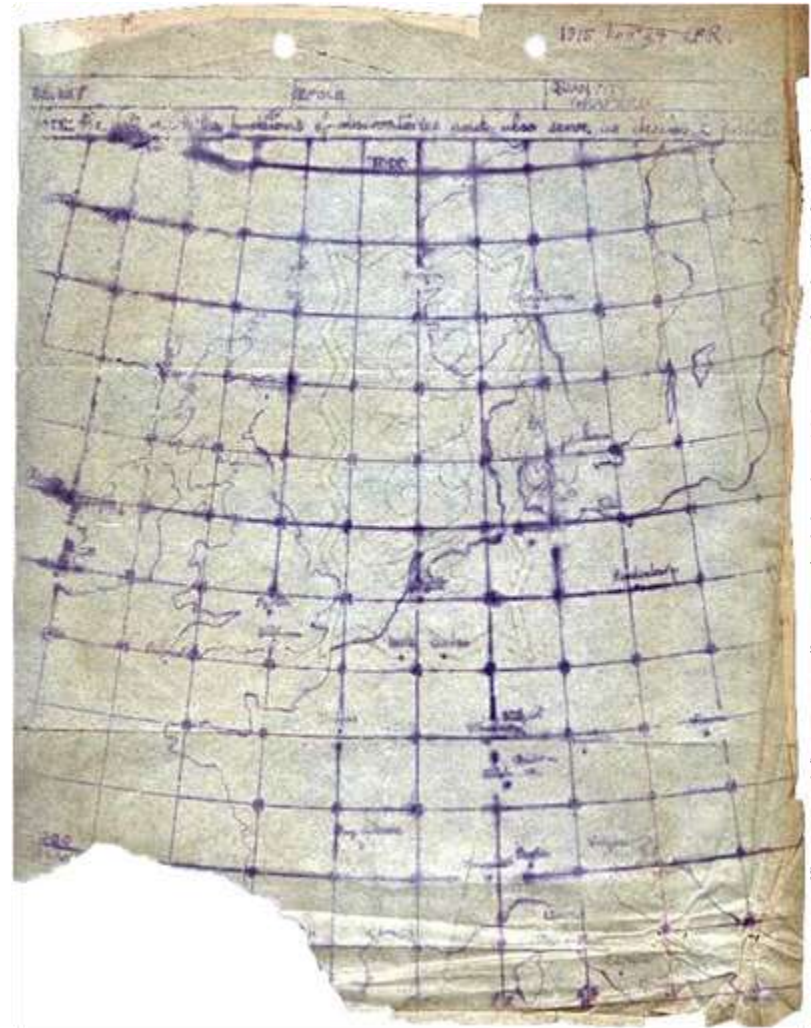
Von diesen insgesamt sieben Variablen (die Windgeschwindigkeit wird durch drei Variablen für die Vektorkomponenten repräsentiert) müssen die jeweiligen Anfangswerte bekannt sein; für die Vorhersage der weiteren Entwicklung sind sieben Gleichungen relevant: Drei Bewegungsgleichungen (als Differentialrelationen zwischen Geschwindigkeit, Dichte und Druck), die Kontinuitätsgleichung (also das Prinzip der Erhaltung der Masse, hier als Differentialrelation von Geschwindigkeit und Dichte), der erste Hauptsatz der Wärmelehre, die Wasserdampfgleichung und die Gasgleichung. Das resultierende Gleichungssystem besteht allerdings aus nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen mit nichtkonstanten Koeffizienten; es ist in analytischer Form nicht geschlossen lösbar.

Da eine numerische Approximation von Bjerknes als viel zu aufwändig angesehen wurde, entwickelte er eine graphische Methode zur approximativen Lösung des Gleichungssystems. (Das Vorlesungsverzeichnis der Universität Leipzig führt noch für das Sommersemester 1913 eine Vorlesung „Die Elemente einer graphischen Mathematik zur Behandlung naturwissenschaftlicher Aufgaben, im besonderen der Meteorologie und der Hydrographie“ von ihm auf.) Er schlägt eine geometrische Konstruktion für eine Menge von Punkten vor, die dann durch Interpolation und Augenmass verbunden werden sollen: „Auf Grund der angestellten Beobachtungen wird der Ausgangszustand der Atmosphäre durch eine Anzahl von Karten dargestellt, welche die Verteilung der 7 Veränderlichen von Schicht zu Schicht in der Atmosphäre angeben. Mit diesen Karten als Ausgangspunkt soll man neue Karten von Stunde zu Stunde darstellen.“ Mit „Stunde zu Stunde“ ist die Zeit diskretisiert; gleicherweise wird auch die räumliche Dimension gerastert: „Die Vorhersage darf sich [...] nur mit Durchschnittsverhältnissen über grössere Strecken und für längere Zeiten beschäftigen, sagen wir beispielsweise von Meridiangrad zu Meridiangrad“. Bjerknes sah zwar noch keine Möglichkeit, seine Ideen für eine tatsächliche Vorhersage praktisch nutzbar zu machen; die Idee der **räumlich-zeitlichen Rasterung** der Atmosphäre sollte sich in den darauffolgenden Jahrzehnten aber als ausserordentlich fruchtbar erweisen.

# Der Weg zur numerischen Wetterprognose (4)

Einige Jahre später propagierte [Lewis Fry Richardson](#) eine arithmetisch-numerische Approximationslösung des Gleichungssystems von Bjerknes; die Differentialgleichungen sollten dabei durch entsprechende Differenzengleichung ersetzt werden. Er schrieb:

„Whereas Prof. Bjerknes mostly employs graphs, I have thought it better to proceed by way of numerical tables. The reason for this is that a previous comparison of the two methods, in dealing with differential equations, had convinced me that the arithmetical procedure is the more exact and the more powerful in coping with otherwise awkward equations.“ Während des ersten Weltkriegs berechnete er in sechswöchiger mühevoller Rechenarbeit im Nachhinein eine sechsstündige Prognose, die allerdings zu einem völlig falschen Resultat führte. Tatsächlich kannte Richardson die mathematischen Kriterien an die Raum- und Zeitinkremente, unter denen eine numerische Integration einer partiellen Differentialgleichung mit finiten Differenzen gut gelingt, noch nicht; diese wurden erst in den späten 1920er-Jahren von Richard Courant, Kurt Friedrichs und Hans Lewy in Göttingen entwickelt.



Skizze eines Gitters über Westeuropa von Richardson

# Der Weg zur numerischen Wetterprognose (5)

Das misslungene Prognoseexperiment und die langwierige Rechenprozedur mögen Richardson enttäuscht haben und jahrzehntelang andere Wissenschaftler von der Methode abgehalten haben, dennoch stellt das von ihm propagierte Prinzip der numerischen Wettervorhersage im Wesentlichen das heute auf Supercomputern angewendete Verfahren dar. Auf dem jahrzehntelangen Weg dahin musste freilich noch einiges geschehen: Zunächst muss ein besseres Verständnis der Atmosphärendynamik erzielt werden und dieses dann in meteorologische Modelle umgesetzt werden. Dazu gehört die Evaluation derjenigen hydro- und thermodynamischen Faktoren, die den grössten Einfluss auf das Wetter haben und die Abstraktion von als weniger relevant erkannten Aspekten wie z.B. hochfrequent überlagertes „Rauschen“ einer Entwicklung einer Kenngrösse. Aber auch der meteorologische Einfluss und die geeignete Wahl der seitlichen Randwerte des Gittermodells war ein zu lösendes Problem. Ferner waren Fortschritte in der Numerik erforderlich, vor allem um Stabilität der Berechnungsalgorithmen für die Integration partieller Differentialgleichungen hinsichtlich Rundungseffekten und der Auslöschung kleiner Werte zu garantieren. Die zeitnahe Gewinnung von Atmosphärenmesswerten in der dritten Dimension mittel Radiosonden an Wetterballons war ein weiteres neues und essentielles Element auf dem Weg zur erfolgreiche numerischen Prognose. Schliesslich war, damit die Aussage eines Rechenergebnisses nicht Nachrede ist, sondern Vorhersage sein kann, wesentlich die „technische Grosstat der Entwicklung von elektronischen Hochgeschwindigkeits-Rechenanlagen, die den zahlenmässig ungeheuren Aufwand an einfachen Rechenoperationen in ausreichend kurzer Zeit bewältigt“ – so schreibt der Meteorologe Hermann Flohn fast schon rückblickend 1956 und fährt fort: „Ihre Verwendung für Zwecke der meteorologischen Praxis stellt die höchsten Anforderungen an Speicherkapazität und Rechengeschwindigkeit“.



# Der Weg zur numerischen Wetterprognose (6)

**Konrad Zuse** konstruierte ab ca. 1936 Rechenautomaten; mit der Z4 gelang ihm 1945, am Ende des zweiten Weltkriegs, die Flucht aus Berlin ins Allgäu. Die Z4 wurde erst 1950 von der ETH gekauft, zuvor fehlten Zuse im Allgäu die Mittel und Möglichkeiten, konstruktiv tätig zu sein. In dieser Zeit arbeitete er vor allem theoretisch und entwickelte Pläne zum Einsatz seiner Rechner. Unter anderem kam ihm dabei die Wettervorhersage als Anwendungsgebiet in den Sinn. Zuse war Ingenieur und kein Mathematiker, Physiker oder Meteorologe. Daher konnte er auch nicht die numerischen Verfahren zur Berechnung der physikalischen Modelle beurteilen oder weiterentwickeln; das Konzept einer immersiven grafische Benutzeroberfläche für die „**Grosswetterrechenmaschine**“ erscheint allerdings visionär. Nachfolgend einige Auszüge aus seiner Schrift „Aufbau eines umfassenden Wetterrechnungsdienstes mit Hilfe von Zuse-Rechenmaschinen“ von 1947:

*Die von der Firma Zuse-Apparatebau entwickelten neuartigen Rechengeräte ermöglichen eine weitgehende Automatisierung und Erweiterung der Berechnungsmethoden der Wettervorhersage. [...] Bei der laufenden Wettervorhersage ist in erster Linie der enorme Zeitgewinn wesentlich, der durch Verwendung von Zuse-Rechenmaschinen möglich ist. Die Geräte lassen sich so konstruieren, dass aus den laufenden Daten über die Wetterbeobachtung fast ohne Zeitverzug die für die Wettervorhersage notwendigen Resultate errechnet werden können, wobei der Umfang und die Gründlichkeit der Rechnung und damit die Zuverlässigkeit der Wettervorhersage gegenüber bisherigen Methoden noch erheblich gesteigert werden kann.*

*Als Berechnungsmethoden kommen grundsätzlich zwei Wege in Frage.*

- a) Aus der gegebenen Ausgangssituation (Luftdruck-, Temperatur-, Feuchtigkeitsverteilung, Vektorfeld der bestehenden Windrichtung und dergleichen) wird durch **numerische Integration** die folgende Entwicklung errechnet. Diese Methode ist in voller Strenge nicht durchführbar, da sie ein zu dichtes Beobachtungsnetz erfordert und der enorme Rechenaufwand [...]*

# Der Weg zur numerischen Wetterprognose (7)

b) Die gegebene Situation und der bisherige Wetterverlauf wird mit früheren Wetterabläufen verglichen und durch **Analogie-Schlüsse** der weiteren Verläufe abgeschätzt. [...]

Praktisch kommt eine Vereinigung von Methode a) und b) in Frage. [...] Die Vorausberechnung des Wetters erfolgt teils durch statistische Vergleiche teils durch numerische Integration. [...]

Für die äussere Organisation eines solchen Wetterdienstes besteht etwa folgende Möglichkeit:

a) Ein Netz von **Beobachtungsstationen** liefert die Daten der bestehenden Wetterlage. Hierbei ist, um Zeitverzug zu vermeiden, eine möglichst automatische Übertragung der Daten auf die Rechenmaschine anzustreben. [...]

b) In **Zwischenstationen** werden die Beobachtungsergebnisse gesammelt und auf die Rechenmaschine übertragen. Durch sie werden die Beobachtungen durch Interpolation ergänzt. [...]

c) In **Zentral-Stationen** werden die Auswertungen der Zwischen-Stationen gesammelt und in einer Grosswetterrechenmaschine die Wettervorhersage durchgeführt. [...] Die Demonstrierung des Wettervorgangs erfolgt dabei weitgehend automatisch durch Projektoren und Auswertgeräte, welche die Wetterkarte automatisch an eine nach Art eines Planetariums gebaute Projektionsfläche werfen. Hier kann momentan die gesamte Wettersituation des Erdballs überblickt werden. [...] Die **Projektion der Erdoberfläche** erfolgt so, als ob der Beobachter sich im Mittelpunkt der Erde befindet. [...]

Die Zentral-Wetterbeobachtungsstelle kann **nach Art eines Planetariums** für den öffentlichen Besuch freigegeben werden. Hierdurch sind nicht unbedeutende Einnahmen möglich.

[Unveröffentlichtes Typoskript, <http://zuse.zib.de/>]

# Der Weg zur numerischen Wetterprognose (8)

In den USA war [John von Neumann](#) um das Jahr [1945](#) mit elektronischen Rechenmaschinen befasst; er „rekrutierte“ unter anderem auch die ENIAC für Berechnungen mathematisch-physikalischer Modelle im Rahmen des Manhattan-Projekts (Entwicklung und zum Bau einer Atombombe). Im Oktober 1945 erhielt er von Vladimir Zworyki, einem Ingenieur der RCA Laboratories, ein Memorandum mit dem Titel „Outline of Weather Proposal“, worin argumentiert wurde, dass moderne technische Kommunikationsmittel eine exaktere Wettervorhersage ermöglichen sollten, was letztendlich auch die Grundlage für die Beeinflussung des Wettergeschehens darstellen würde. Von Neumann, der schon einige Zeit mit der Möglichkeit der numerischen Wetterprognose schwanger gegangen war, antwortete ihm sofort:

“[...] I think that the [mathematical problem of predicting weather](#) is one which can be tackled, and should be tackled. It will require very extensive computing, but the equipment to do this is now becoming available or can be developed. Clearly the problem can be attacked on various levels of abstraction: anywhere between the purely sorting approach which compares present weather maps with past ones and attempts to establish the [closest analogous past situation](#) in order to extrapolate by past experience; and the [entirely aerodynamical](#) one which would aim to compute the movements of air masses starting from the present distribution of pressures, temperatures, wind velocities, humidity, and the states of radiation, reflection, and absorption. If it were not for the considerable uncertainties of turbulent heat transfer, even the latter purely-theoretical approach would be feasible with electronic computing that might be available within the next few years. [...]”

Anders als Zuse glaubte von Neumann, dass eine rein numerische Berechnung machbar sein sollte. Dazu veranstaltete er im August 1946 am Institute for Advanced Study in Princeton eine [“Conference on Meteorology”](#); ihn interessierte die “theory of dynamic meteorology in order to make it accessible to high speed, [electronic, digital, automatic computing](#)”.



# Der Weg zur numerischen Wetterprognose (9)

So war es schliesslich [J. von Neumann](#), der Ende der 1940er-Jahre in Princeton neuen Schwung in die numerische Wetterprognose brachte. Er kannte sowohl die Ansätze von Richardson als auch die Arbeiten aus Göttingen um Richard Courant zu den numerischen Stabilitätskriterien – letztere aus erster Hand, da er selbst 1926/1927 in Göttingen weilte. Von Neumann schätzte den Rechenbedarf für ein einfaches Prognosemodell ab und kam zum Schluss, dass dies auf der [ENIAC](#), dem ersten elektronischen Universalcomputer, ausführbar sein sollte. Aufgrund der Arbeitsweise mit Elektronenröhren rechnete ENIAC für die damalige Zeit sehr schnell: Eine Addition brauchte 0.2 ms, eine Multiplikation ca. 2.8 ms, eine Division ca. 24 ms. Die Prognoseergebnisse mit einem stark vereinfachten Atmosphärenmodell waren tatsächlich vielversprechend; 1950 veröffentlichte Von Neumann mit zwei Mitautoren die Resultate. Im Gedenken an die langwierigen manuellen Berechnungen von Richardson schreiben sie

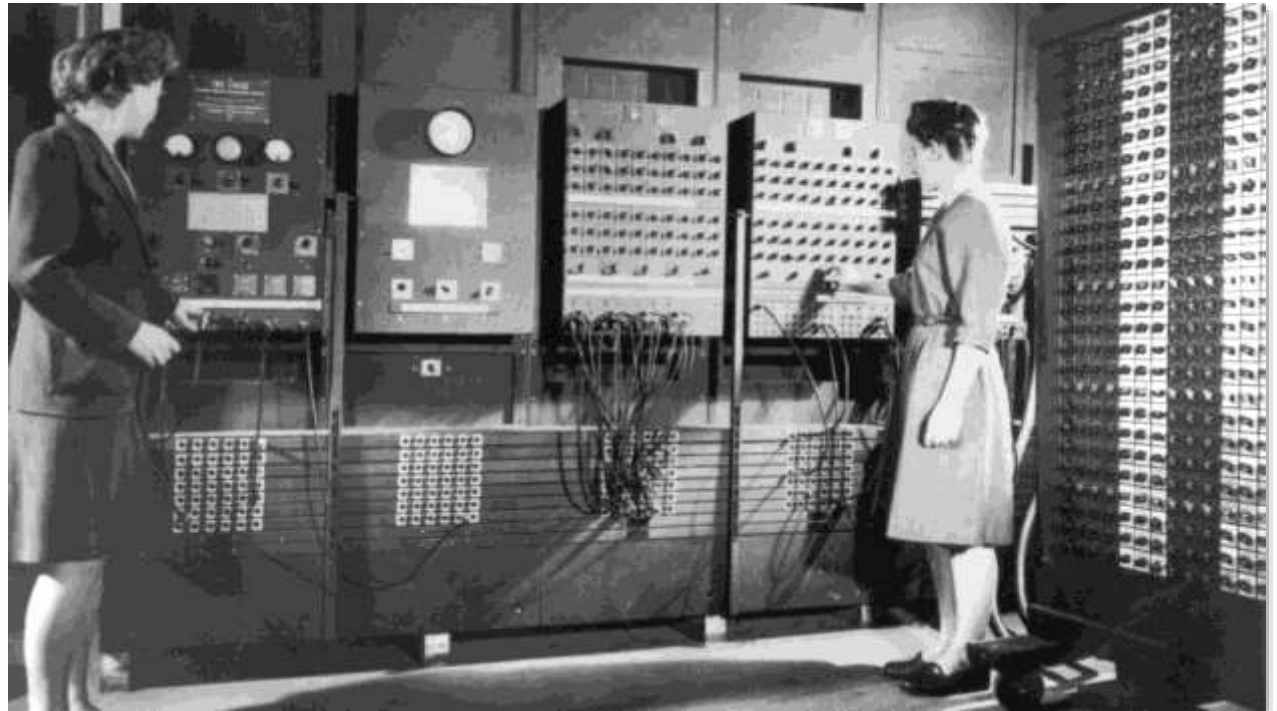
“The objective of this project is an investigation of the theory of dynamic meteorology in order to make it accessible to high-speed, electronic, digital, automatic computing...” John von Neumann, Mai 1946

Peter Lynch (Dublin) implementierte 2008 den Algorithmus auf einem NOKIA 6300 [Mobiltelefon](#) (~ 1 MIPS); analog zur ENIAC nannte er sein System „[Phoniac](#)“. Die Vorhersageberechnung dauerte damit < 1 [Sekunde](#).



# Der Weg zur numerischen Wetterprognose (10)

mit leicht ironischem Unterton: „It may be of interest to remark that the **computation time for a 24-hour forecast was about 24 hours**, that is, we were just able to keep pace with the weather.“ Die Autoren danken auch **Klara von Neumann**, der Ehefrau von John von Neumann, für die Mitarbeit bei der Programmierung des ENIAC-Computers; tatsächlich war sie einer der weltweit ersten Programmierer. Der Erfolg dieses Prognoseexperiments stellte einen Durchbruch dar: In den folgenden Jahren wurde nicht nur in den USA, sondern u.a. bei meteorologischen Forschungsinstitutionen in Grossbritannien, Schweden, Deutschland und Japan an der methodischen Verbesserung der numerischen Wettervorhersage gearbeitet, so dass sie ab den 1960er-Jahren tatsächlich operativ, und gleich mit gutem Erfolg, eingesetzt werden konnte.



Zwei Operateurinnen vor dem Hauptsteuerpult des ENIAC

**ENIAC:** Ca. 18000 Elektronenröhren, 27 t, 174 kW, U-förmiger Aufbau auf 10 m × 17 m; als Speicher fungierten Lochkarten, zusammen mit Lochkartenlese- und -stanzgeräten.



# Von Neumanns numerische Prognose

Die ersten Rechnungen auf der ENIAC im Jahr 1950 waren so vielversprechend, dass sie grosse Erwartungen weckten und als Initialzündung für weitere und letztendlich erfolgreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der numerischen Wetterprognose wirkten. Der Meteorologe Karl-Heinz Hinkelmann merkte allerdings kritisch an: *„Die Numerische Wettervorhersage begann also gleich mit einer Jugendsünde in Form einer bestürzenden physikalischen Vereinfachung und kennzeichnet damit ein allgemeines Dilemma und einen permanenten Konflikt: Die das Wetter ausmachende Physik ist viel zu kompliziert für die viel zu langsamen Rechenmaschinen, die für eine Tagesprognose nicht mehr als eine gute Stunde Rechenzeit verbrauchen dürfen, wenn ihre Ergebnisse noch aktuell sein sollen. Was die numerische Wettervorhersage integriert und auch nur integrieren kann, ist daher nur ein Abklatsch der realen Physik der Atmosphäre oder ein atmosphärisches Modell.“* [K.-H. Hinkelmann: Probleme der numerischen Wettervorhersage. Annalen der Meteorologie N. F. Nr. 6 (1973), 11-23]

## Numerical Integration of the Barotropic Vorticity Equation

By J. G. CHARNEY, R. FJÖRTOFT<sup>1</sup>, J. von NEUMANN  
The Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey<sup>2</sup>

(Manuscript received 1 November 1950)

### Abstract

A method is given for the numerical solution of the barotropic vorticity equation over a limited area of the earth's surface. The lack of a natural boundary calls for an investigation of the appropriate boundary conditions. These are determined by a heuristic argument and are shown to be sufficient in a special case. Approximate conditions necessary to insure the mathematical stability of the difference equation are derived. The results of a series of four 24-hour forecasts computed from actual data at the 500 mb level are presented, together with an interpretation and analysis. An attempt is made to determine the causes of the forecast errors. These are ascribed partly to the use of too large a space increment and partly to the effects of baroclinicity. The rôle of the latter is investigated in some detail by means of a simple baroclinic model.

### Introduction

Two years ago the Meteorological Research Group at the Institute for Advanced Study adopted the general plan of attacking the problem of numerical weather prediction by step by step investigation of a series of models approximating more and more the real state of the atmosphere. In accordance with this plan the two-dimensional barotropic model was chosen as the first object of study. The first two publications<sup>1</sup> dealt with the numerical properties of the linearized barotropic equations as a preparation for the numerical integration of the non-linear equations. Such integra-

tions have now been performed and will be described in the present article.

These integrations would not have been possible without the use of a high-speed large-capacity computing instrument. We should like, therefore, to express our warmest thanks to the U. S. Army Ordnance Department and the administration of the Ballistic Research Laboratories in Aberdeen, Maryland for having generously given us the use of their electronic computing machine (The Eniac [compare footnote 5]). The request for the use of the Eniac was made on our behalf by the U. S. Weather Bureau and we should like to thank them also for their gratifying interest and support.

The reasons for regarding the integration of the barotropic equations as an essential

J. G. Charney, R. Fjörtoft, and J. von Neumann (1950) Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus* 2(4), 237-254.



# John von Neumann über seine rechnerische Wettervoraussage

Die Atmosphäre ist ja schliesslich und endlich eine Flüssigkeit, und man kann ausrechnen, was sie tun wird. -- John von Neumann

1954 hält John von Neumann einen Vortrag „Entwicklung und Ausnutzung neuerer mathematischer Maschinen“ in Düsseldorf. (Einen zweiten Vortrag auf dieser Tagung der Arbeitsgemeinschaft für Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen hält ETH-Professor Eduard Stiefel; er spricht über die Zürcher Erfahrungen mit der Z4). Neumann kommt dabei auch auf seine numerische Wetterprognose mit der ENIAC, die „**rechnerische Behandlung der dynamischen Meteorologie**“ zu sprechen:

„Es handelt sich hierbei um das Verstehen der Hauptzüge der atmosphärischen Zirkulationen im Großen, des Wetters im Kleinen und somit der klimatischen Verhältnisse im Allgemeinen. Die erste Stufe [...] ist die Ausarbeitung von mehr oder weniger vereinfachten hydrodynamischen Modellen der Atmosphäre, deren Gültigkeit dadurch zu beweisen ist, daß mit ihrer Hilfe kurzfristige Wettervoraussagen für beschränkte Gebiete möglich sind. Aus diesem Grunde haben wir 24- und 48stündige Voraussagen des hydrodynamischen Zustandes der Atmosphäre für die Vereinigten Staaten und die angrenzenden Gebiete durchgeführt. Übrigens waren diese Bemühungen recht erfolgreich, so daß der Wetterdienst der Vereinigten Staaten zusammen mit der Marine und der Luftwaffe auf Grund unserer Methoden einen dauernden rechnerischen Wettervoraussagedienst einrichtet. Dieser wird wohl im Laufe des nächsten Jahres mit einer großen, vollautomatischen Schnellrechenmaschine (vom Typ ‚701‘ der International Business Machine Corporation) regelmäßig funktionieren. [...] können die Differentialgleichungen dann für irgendwelche ausgedehnte, in Bezug auf meteorologische Phänomene in allen Höhenlagen und jederzeit wohlbeobachtete Teile der Erdoberfläche angesetzt werden.

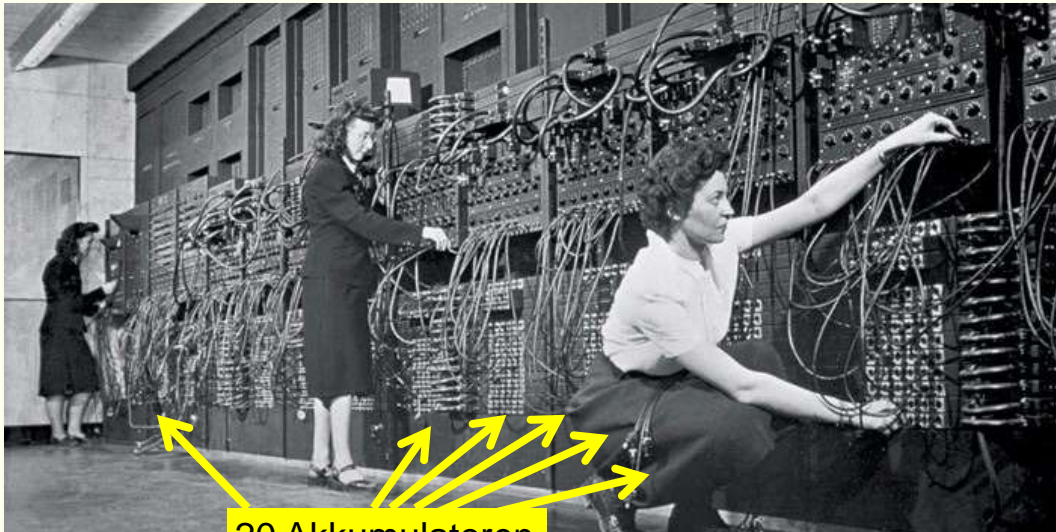
# John von Neumann über seine rechnerische Wettervoraussage (2)

Wir haben Rechnungen für die Vereinigten Staaten mit einer Ränderung von etwa 1000 km angestellt. Die 'geographische Auflösung', die die heute verfügbare Beobachtungsdichte rechtfertigt, ist etwa 300 km. Somit haben wir etwa 300 km x 300 km Quadrate als Elementargebiete und darum im Bereich der Untersuchung ungefähr 20 x 20 solcher Elementargebiete. Es kommt nun noch darauf an, in wie viele Höhenlagen man die Atmosphäre vertikal 'auflöst'. [...] Die 1-Lagen-Rechnung erfordert etwa 200000 Multiplikationen. Unsere Rechenmaschine hat eine Multiplikationszeit von etwa 1/2 Millisekunde und wir können in der Regel eine Multiplikationsdichte von etwa 25% erzielen, d.h. de facto 500 Multiplikationen pro Sekunde ausführen. Dementsprechend dauerte bei uns eine 1-Lagen-Rechnung 6 Minuten. Eine 3-Lagen-Rechnung ist etwa 8mal umfangreicher und dauert 50 Minuten. [...]

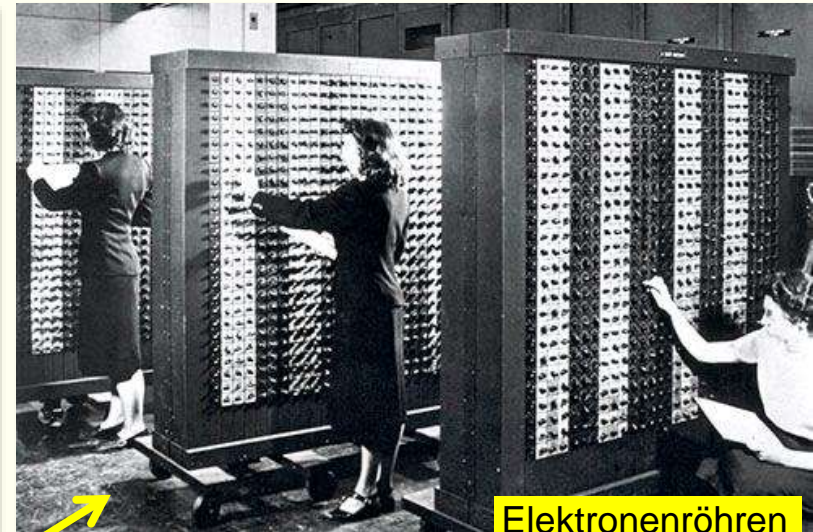
Übrigens werden gegenwärtig die Radiosondenbeobachtungen von Menschen abgelesen, durchtelegraphiert und bei der Rechanlage wieder von Menschen in Lochkarten gestanzt. Auch diese Zeitverluste sind behebbar. Die elektrischen Radiosondenmeldungen sollten automatisch in einen Morse-Code übertragen werden, dieser automatisch von jeder Beobachtungsstation zur zentralen Rechenstelle durchtelegraphiert werden und dort automatisch (über den Weg von Lochkarten oder auch direkt) in die Maschine gefüttert werden.“

# ENIAC (ab 1945)

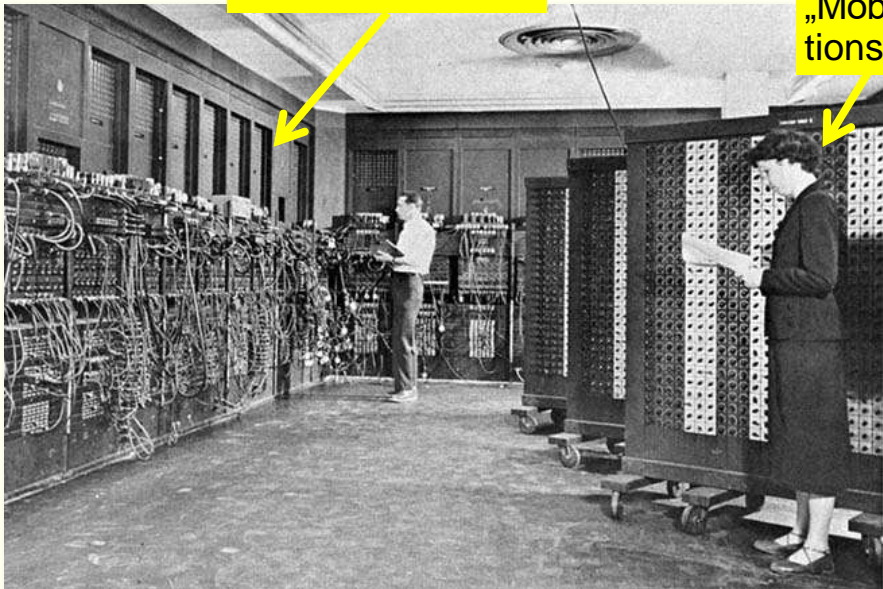
„ENIAC war kein Einzelgerät, sondern ein Raum mit 40 miteinander verkabelten Elektronik-Gestellen, drei Rollschränken mit Drehschaltern sowie Apparaten zum Einlesen und Ausgeben von Lochkarten.“  
-- <https://blog.hnf.de>



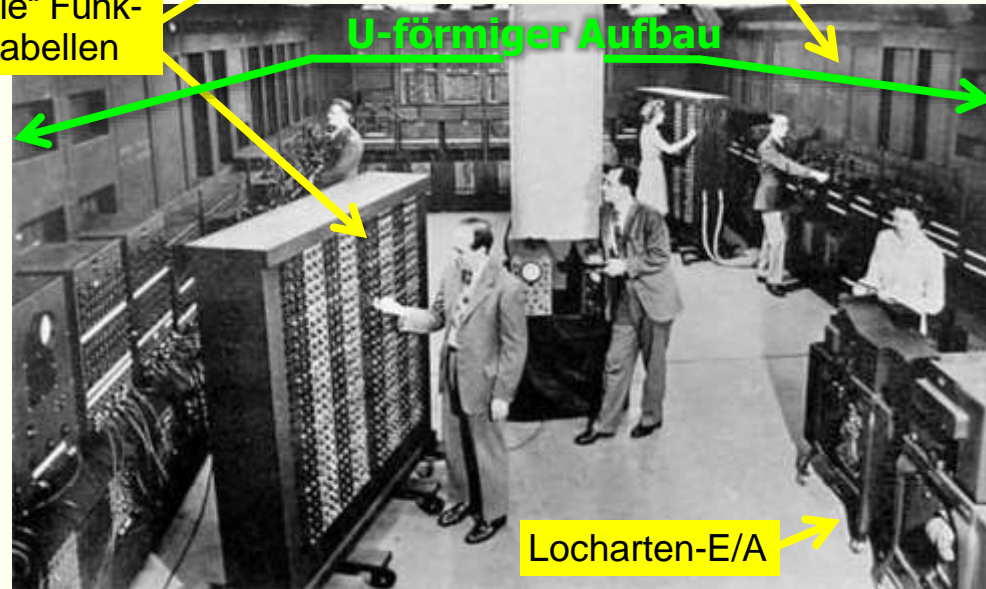
20 Akkumulatoren



Elektronenröhren



„Mobile“ Funktionstabellen



U-förmiger Aufbau

Locharten-E/A



# ENIAC (2)

**Auszug aus: “Giant Brains or Machines That Think” von Edmund C. Berkeley, 1949:**

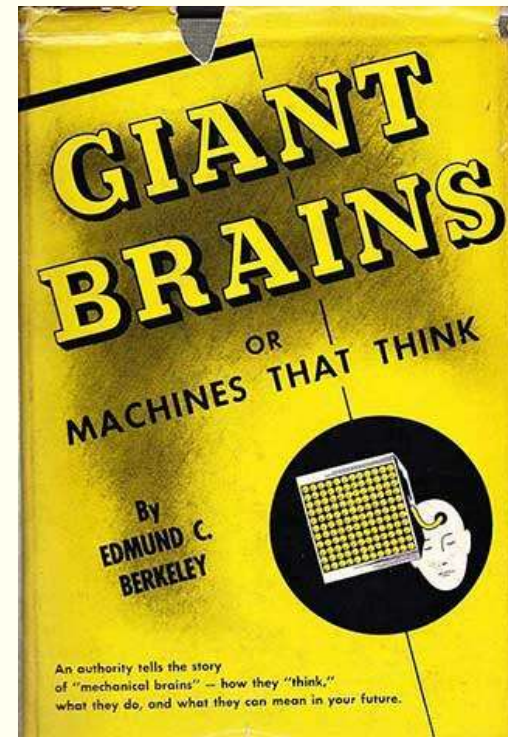
The main part of Eniac consists of **42 panels**, which are placed along the sides of a square U. Each of these panels is 9 feet high, 2 feet wide, and 1 foot thick. They are of sheet steel, painted black, with switches, lights, etc., mounted on them. Each panel is an assembly of some equipment: Initiating Unit, Cycling Unit, Master Programmer, Accumulator 1 - 20, Multiplier, Function Table 1 - 3, Constant Transmitter,...

There are over **18,800 electronic tubes** in the machine. Actually, an accumulator needs 550 electronic tubes. Large motors and fans above the machine suck the heated air away through the ducts. There are also 5 pieces of equipment which can be rolled from place to place and are called portable.

There are three ways by which information – numbers or instructions – can go into the Eniac. Numbers can be put **into the machine** by means of punch cards fed into the Card Reader, or switches on the Constant Transmitter. Numbers or instructions can also go into the machine by means of the Function Tables. Here there are dial switches, which are set by hand.

There are two ways by which numerical information can **come out of the machine**. Numbers can come out of the machine punched on cards by the Summary Punch. They are then printed in another room by means of a separate IBM tabulator. Also, in order to show what

number



# ENIAC (3)

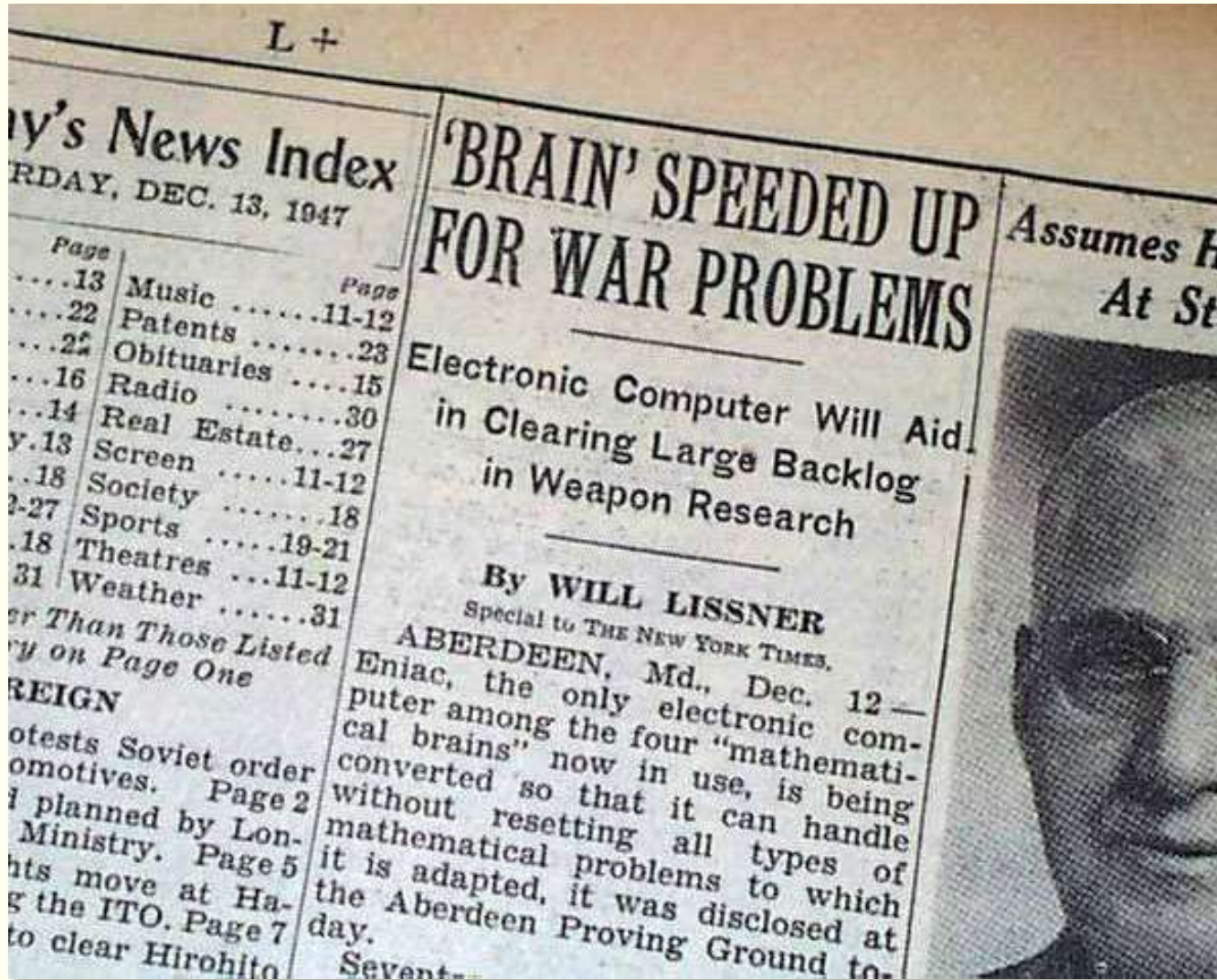
number is stored in an accumulator, there are 100 little neon bulbs mounted on the face of each accumulator panel. Each bulb glows when the flip-flop that belongs to it is on.

Eniac has three [Function Tables](#). Here you can store numbers or instructions for the machine to refer to. Each Function Table has 104 arguments. For each argument, you can store 12 digits. To put in the numbers or instructions, you have to go over to these panels and set the numbers or instructions, digit by digit, turning dial switches by hand. It is slow and hard to do this right, but once it is done, Eniac can refer to any number or instruction in any table in 1/1000 of a second.

In general, there are [two different ways to instruct Eniac to do a problem](#). One way is to set all the switches, plug all the connections, etc., for the specific problem. This is a long and hard task. Very often, even with great care, it is done not quite correctly, and then the settings must be carefully checked all over again. A second method (called the [von Neumann programming method](#)) is to store all the instructions for a problem in one or two function tables of Eniac and then tell Eniac to read the function tables in sequence and to do what they say. The rest of the machine is then wired up in a standard fashion. This method of instructing Eniac was proposed by Dr. John von Neumann of the Institute of Advanced Study at Princeton. Eniac has been modified to the slight extent needed so that this method can be used when desired. In this method, each instruction is a selected one of [60 different standard instructions](#) or orders – one of them, for example, being “multiplication.” Each standard order is expressed by 2 decimal digits. The 60 standard orders are sufficient so that Eniac can do any mathematical problem that does not overstrain its capacity. Since each of the 3 Function Tables can hold 600 2-digit instructions, the machine can hold a program of 1800 instructions under the von Neumann programming method. □

# ENIAC (4)

„Ob die Menschen jetzt wohl überflüssig werden? Das gigantische Elektronengehirn habe zu denken begonnen. Mit Röhren wie in jedem Radio. Der welt-erste Elektronenrechner könne meterlange Zahlenkolonnen in der Sekunde addieren. Gerade denke er über mathematische Probleme der Armee nach. Aber eines Tages womöglich auch über unsere Steuererklärung.“ -- Wochenschau



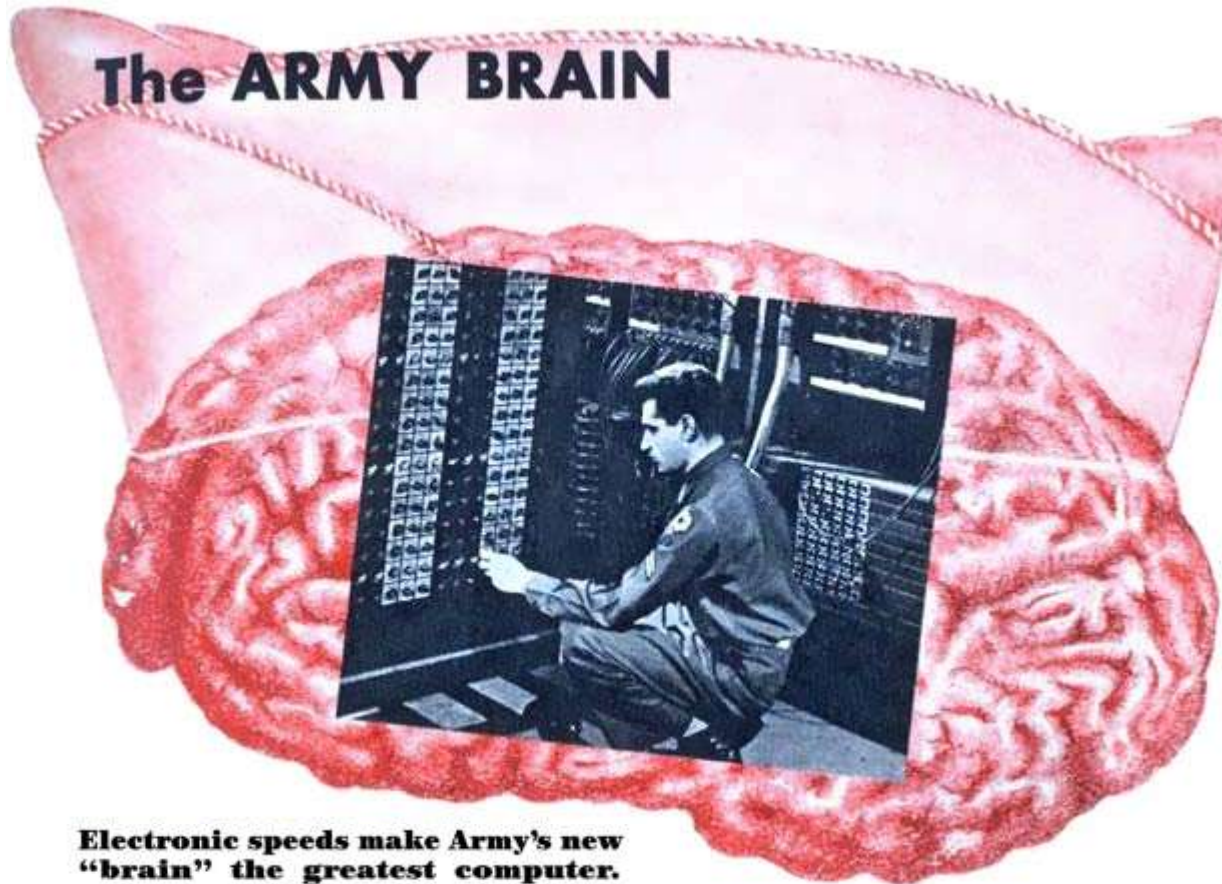
Bereits 1947 wurde die ENIAC auf Vorschlag von Neumanns so modifiziert, dass ein **gespeichertes Programm** ausgeführt werden konnte („Von-Neumann-Architektur“).

In der Presse wurden Computer seinerzeit noch oft als „**giant brains**“ bezeichnet; ENIAC war der erste (und damals einzige) „elektronische“ Computer. (Colossus und die Atanasoff-Berry-Maschine werden hier nicht mitgerechnet, da sie nicht frei programmierbar sind.)



# „Electronic Brain is Unveiled“

On Saturday, [February 14, 1946](#), the Moore School of Engineering unveiled ENIAC to the press for the first time. This event was hailed in newspapers all over the U.S. and Europe. It provided the public with its first view of large-scale, high-speed computers. In bold headlines [ENIAC was called a brain](#) and was pictured in the June 1946, issue of *Mechanix Illustrated* superimposed over a human brain.



**Electronic speeds make Army's new "brain" the greatest computer.**

“The main part of the demonstration was the trajectory. For this we chose a trajectory of a shell that took 30 seconds to go from the gun to its target. Remember that girls could compute this in three days, and the differential analyzer could do it in 30 minutes. The ENIAC calculated this 30-second trajectory in just 20 seconds, faster than the shell itself could fly.” [Arthur Burks: Who Invented the General-Purpose Electronic Computer?, 1974]

# „Electronic Brain is Unveiled“ (2)

Headlines Feb. 15, 1946:

- "Army's New **Wonder Brain** and Its Inventors." *Philadelphia Inquirer*.
- "**Mathematical Brain** Enlarges Man's Horizon." *Philadelphia Inquirer*.
- "Mechanical Mathematician '**Brain Child**' of Hopkins Man." *The Baltimore Sun*.
- "**Magic Brain** Spurs Science and Technology." *New York World-Telegram*.
- "**Electronic 'Brain'** Computes 100-Year Problem in 2 Hours." *New York Herald Tribune*.
- "New 30-Ton **Electronic 'Brain'** is Unveiled; Is World's Fastest Calculating Machine: Tubes Speed Up Laundryman's Abacus Principle." *The Evening Bulletin* (Providence).
- "Fastest **Mechanical Brain** Disclosed; Weighs 30 Tons: Giant Calculating Machine Said to Work 1,000 Times Faster Than Any Previously Built." *Chicago Sun*.
- "Computing **Super-Brain** Aids Army." *Newark Star Ledger*.

Attempts were made by the press to correct misconceptions about the new computing devices. For example, in April of 1946 it was stated in the *Washington News* that "Electronic Super-Brain Has One Limitation... these electronic 'super-brains' are, of course, unable to do any actual thinking". For the most part, however, the anthropomorphic references in headlines shaped the "awesome **thinking machine**" view of computers for years to come. [Dianne Martin: ENIAC: press conference that shook the world. *IEEE Techn. & Soc. Mag.*, 14(4), 3-10, 1995]

# Programmierung des ENIAC-Computers

Bei <https://computerhistory.org/blog/> finden sich interessante Berichte und Anmerkungen zur ENIAC und ihrer Programmierung. Wir zitieren einige Passagen:

In its original form, ENIAC was not “programmed” but was “set up”. The initial design of the ENIAC did not use anything like the software we know today. It was basically an assembly of functional units that were wired together in a particular way for each new problem. If you wanted to do a multiplication after an addition, you would run a wire from the multiplier to the adder. Designing and setting up new calculations was difficult and time-consuming. Configuring ENIAC for a problem was like constructing a special-purpose computer anew each time out of a general-purpose kit of parts.

At the dawn of the modern computing era teenager Laura Lehmer and her brother Donald Lehmer were the youngest “un-programmers.” That is because ENIAC, one of the world’s first general-purpose computers, was programmed with an array of switches and cables. When each program had been run, someone had to return the cables to their proper storage box to be available for the next program. Shortly after the installation of the ENIAC their parents, Derrick Henry Lehmer and Emma Trotskya Lehmer, who were well-known number theorists at the University of California at Berkeley, were invited to use the machine for mathematical research.

ENIAC was not a stored-program computer in the modern sense of the term. Historian David Alan Grier described it as more like an array of electronic adding machines and arithmetic units that were held together by a web of large electrical cables. The machine occupied a large room and was evocative of a telephone switchboard of the era, with a plugboard array that could be rewired with cables of different lengths.



# Programmierung des ENIAC-Computers (2)

That's where Laura Lehmer and her brother came in. As youngsters they would accompany their parents on cross-country car trips to gather valuable research time on the machine. The two children would accompany their parents for the long programming sessions that often stretched into the evening. After the programs ran, their job was to aid in resetting the computer by laboriously disconnected all of the cables and placing them in boxes according to length. "It was our job to strike when the program was over and put all of the cables in their appropriate boxes sorted by lengths," she recalled.

Neither brother nor sister remember precisely what programs their parents were developing. It is possible that they were exploring different methods for predicting the next prime number. Indeed, the Lehmers had a long prior interest in building a computing device to speed up the problem of factoring. As early as 1930, they had proposed the idea of the design of an electric factoring machine to the Carnegie Institute of Technology.

The Lehmers' son recalled: "Things were kind of secret. It could have been war activities. It seemed extremely clandestine. I remember going down a concrete staircase into a building. The doors were 20 feet wide and 10 feet high. When we entered there was a big of rush of air as it was pressurized to keep the dirt out." He remembers that his parents would get access to the machine when it wasn't running its official programs. He also has a clear memory of how painstaking it was to actually program the ENIAC. "It took two or three days and then debugging. Once a program was running people were reluctant to give it up. They would post a guard and tell us, 'don't touch a thing.'"

Both children would go on to careers that were deeply influenced by computing. Laura became a linguist and would later work as a research scientist at Xerox's Palo Alto Research Center. Donald would go on to become an engineer.

# Programmierung des ENIAC-Computers (3)

## 1948: Umbau zu einem programmgesteuerten Von-Neumann-Rechner

„Nach Ideen [John von Neumanns](#) wurde ENIAC 1948 zu einem Computer mit Befehlsspeicher umgebaut. Dies verlangsamte die Rechenleistung auf 1/6, aber die Dauer des Umprogrammierens verringerte sich ebenfalls, sodass insgesamt ein Zeitgewinn erzielt wurde.“ [de.wikipedia.org/wiki/ENIAC] Bei [en.wikipedia.org/wiki/ENIAC] spielen dabei auch andere Personen eine Rolle: „A number of improvements were made to ENIAC after 1947, including a primitive read-only stored programming mechanism using the function tables as program ROM, after which programming was done by setting the switches. The ideas have been worked out in several variants by [Richard Clippinger](#) and his group, on the one hand, and the [Goldstines](#), on the other. Clippinger consulted with von Neumann on what instruction set to implement.“

Im Blog des Computer History Museums in Mountain View heisst es dazu: „Clippinger credits the idea to a spring 1947 suggestion to him by John von Neumann that ‘it would be possible to run the ENIAC in a way very different from the way contemplated when it was designed.’ After the conversion, the wires between the components were fixed in place, and a true ‘program’ was loaded onto the function tables [...]. Another way of looking at this conversion is that the original modular ENIAC was now permanently configured not as a special-purpose machine but as an EDVAC-style general purpose computer.“ [https://computerhistory.org/blog/the-neverending-quest-for-firsts/]

Im Buch „Turing’s Revolution“ von Giovanni Sommaruga und Thomas Strahm heisst es hingegen: „It seems, though, that Clippinger had reinvented the wheel. [Mauchly](#) stated that [Eckert](#) and he had previously worked out the idea.“ Aber eine gute Idee hat ja oft viele Väter...

# Programmierung des ENIAC-Computers (4)

<https://spectrum.ieee.org/image/Mz11ODUwMw.jpeg>



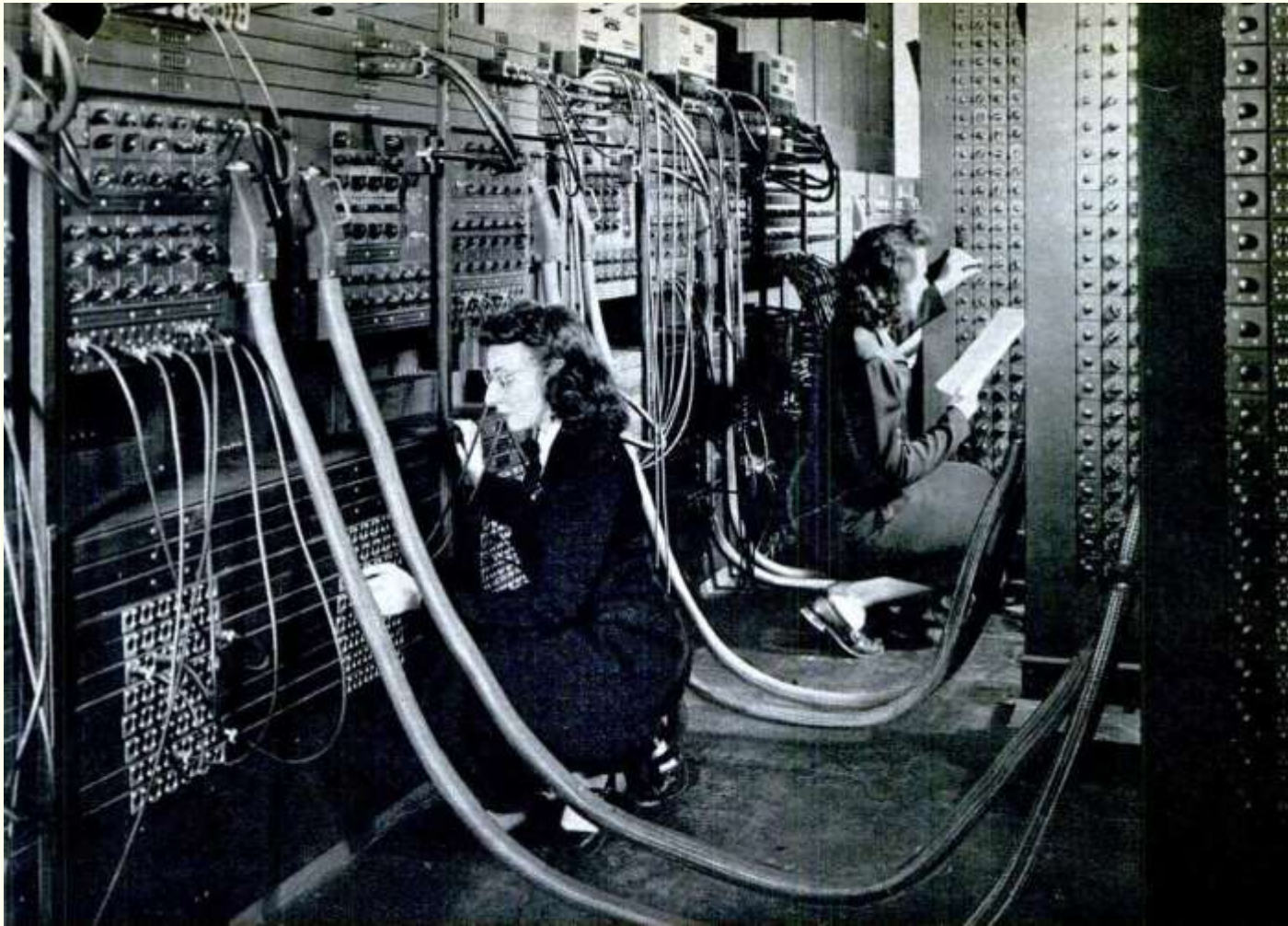
„Es gibt Fotos, die in den 1940er-Jahren entstanden sind, und die Frauen zeigen, die mit hochgesteckten Haaren und ernsten Gesichtern vor riesigen Maschinen stehen. Interessanterweise ging später das Gerücht um, dass diese Frauen nur Pappaufsteller seien.“ -- *Münchener Merkur* Nr. 53, 5. März 2014

*Von wegen Pappaufsteller! Elizabeth „Betty“ Snyder am Schaltschrank der Funktionstafeln, die später als ROM-Speicher für Programme dienten.*

Jeder Tabellenschrank hatte 1200 Dezimalschalter und bot somit Platz für 600 Programmschritte; insgesamt konnten damit Programme mit bis zu 1800 Maschineninstruktionen gespeichert werden.



# Programmierung des ENIAC-Computers (5)



XXX

# Programmierung des ENIAC-Computers (6)

Bei der modifizierten ENIAC wurde als **Programmspeicher** die eigentlich als Funktionstabellen gedachten Einheiten benutzt, die per Schalter eingestellt werden konnten und so einen ROM-Programmspeicher realisierten. Einen „RAM-Speicher“ hatte die Maschine nicht (die Ein-/Ausgabe erfolgte über Lochkarten, die als externe Speichermedien fungierten), sie besass aber **20 Akkumulatoren** („AC“), wovon jeder eine 10-ziffrige Dezimalzahl speichern konnte und den Inhalt eines anderen Akkumulators zu seinem eigenen Inhalt hinzuaddieren konnte.

Der **Befehlssatz** („order vocabulary“) war im Wesentlichen:

- **AC n → AC 15** (19 Befehle für je n = 1,...,14, 16,...20)
- **AC 15 → AC n** (19 Befehle)
- **clear AC 15**
- **negate AC 15**
- **drop sign AC 15**
- **multiply AC 15 by AC 11**
- **divide AC 15 by AC 7**
- **square root of AC 15**
- **branch on positive or zero**
- **shift AC 15 left or right** (10 Befehle, je einer pro Schiebedistanz)
- **double shift AC 15 AC12 pair left or right** (10 Befehle)
- **print** (Inhalt von AC1, AC2, AC15 – AC20 werden auf eine Lochkarte gestanzt)
- **read** (8 zehnziffrige Zahlen einer 80-spaltigen Lochkarte werden eingelesen)

# Programmierung des ENIAC-Computers (7)

Von den 20 Akkumulatoren wurden 8 für interne Zwischenergebnisse bei der Befehlsausführung benötigt, so dass effektiv nur 12 bei der Programmierung zur Verfügung standen.

Es gab [keine Fließkommazahlen](#); den Dezimalpunkt musste man sich bei den 10 Ziffern „hinzudenken“ und die Zahlen entsprechend skalieren – dies führte bei falscher Interpretation leicht zu Programmierfehlern, ausserdem musste man bei arithmetischen Operationen, insbesondere bei Multiplikation und Division, darauf achten, dass entsprechend der Grösse des erwarteten Resultats skaliert wurde.

Programmiersprachen oder Compiler gab es damals natürlich noch nicht; das Programm wurde in der [Maschinensprache](#) (die Befehle waren durch zwei Dezimalziffern verschlüsselt) [über die Schalter der Funktionstabelleneinheiten eingestellt](#); dazu mussten diese Einheiten, die Akkumulatoreinheiten sowie die Einheiten zur Programmsteuerung („global control unit“ und „master programmer“) korrekt miteinander verkabelt werden.

Komplexere mathematische Ausdrücke und mathematische Lösungsverfahren mussten vom Programmierer in Sequenzen einzelner arithmetischer Operationen aufgelöst werden; die (platzsparende) Nutzung der Akkumulatoren musste dazu geplant werden, ferner mussten Skalierungsoperationen und Hilfszähler für Schleifen mittels bedingter Sprungbefehle bedacht werden. Zur [Arbeit der ersten Programmierer](#) heisst es bei [mitpress.mit.edu/blog](http://mitpress.mit.edu/blog): „They faced every imaginable kind of problem: programming errors, mathematical mistakes, many different kinds of hardware failure, intermittent problems that introduced subtle errors, operator errors, time lost to hardware upgrades...“. Testbeispiele waren die [Berechnung von  \$e\$  und  \$\pi\$](#)  auf mehrere 1000 Stellen; zu den ersten echten Anwendungen heisst es: „Analyze data from [V2 test firings](#), run the first numerical [weather forecasts](#), plot shell trajectories, and [simulate nuclear explosions](#).“



# Programmierung des ENIAC-Computers (8)

http://eniacion.com/the-book/eniac-monte-carlo-poster/

114	AB	50	5
	S/L1	66	
	N/D6	84	
#58*	12	12	
	71	71	
	15	15	
115	4E	24	
	12E	62	
	CT	69	
	N/D6	83	
	01	01	
	18	18	
116	N2D	72	
	02	02	
	S1R2	49	
#64	2E	22	62
	2E	02	22
	N/D6	83	02

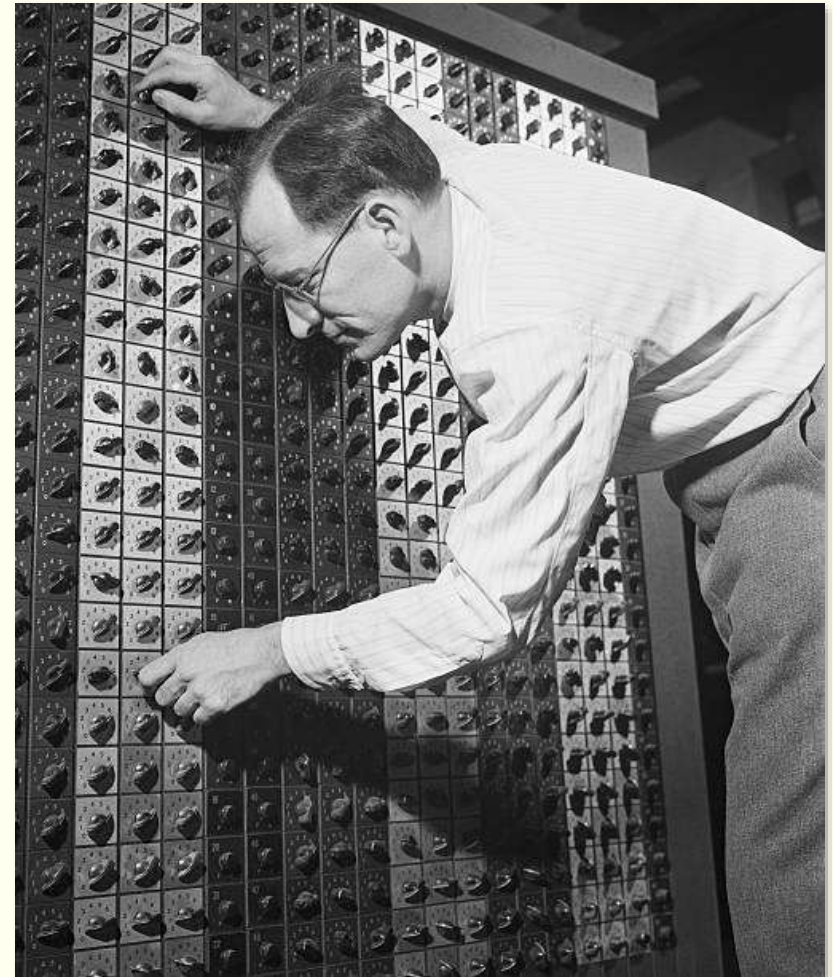
Actual Technique.  
The Use of the Eniac  
Before describing the details of the actual running of the <sup>first</sup> six experimental problems based on the Monte-Carlo method, we would like to discuss here briefly the new <sup>method of operation</sup> and seemingly, more efficient <sup>way</sup> which was used for the first time on the Eniac, to compute these problems.  
This new method is based on a vocabulary, i.e. a set of orders which is conveyed to the machine on two levels; the ~~...~~

Ausschnitte aus dem ersten „nützlichen“ ENIAC-Anwendungsprogramm (von [Klara von Neumann](#)) und dem zugehörigen Report. Es handelt sich um eine [Monte-Carlo-Simulation](#) der Neutronenausbreitung bei einer [explodierenden Atombombe](#); das mathematische Modell und der algorithmische Ansatz stammen von John von Neumann („it is, of course, neither an actual ‘computing sheet’ for a (human) computer group, nor a set-up for the ENIAC, but I think that it is well suited to serve as a basis for either“). Die Programmläufe und Berechnungen fanden im Frühjahr 1948 statt. „This is a major, [800 instruction program](#) with [nested loops](#) and [branching statements](#) [...] The first program ever run is a big, complex, difficult program, [...] including a [subroutine](#). The first subroutine to generate pseudo-random numbers.“ [Mark Priestley]

# Programmierung des ENIAC-Computers (9)

Wie mühsam das Programmieren und Ausführen eines Programms seinerzeit war, dies berichtet der Meteorologe [George Platzman](#) (1920 – 2008) von der Universität Chicago, der im Herbst 1950 bei von Neumanns Projekt der numerischen Wettervorhersage dabei war:

"I tell you about the difficulties we had to contend with. These were of two kinds: operational problems and programming problems. Probably the main source of [operational trouble](#) was the ENIAC itself, which had a mean error-free path of only a few hours and often took many hours to repair. Each of the 20 accumulators was dependent on 550 vacuum tubes! Malfunction of the punchcard equipment, while not so time-consuming, was nevertheless a constant background of interruption to our progress. Human error was not a major problem because, fortunately, the operators were highly skilled, but it did inevitably happen somewhere in the 14 separate punchcard procedures required in each time step. What of programming problems?"



Eingeben des Programms an den Funktionstabellen



# Programmierung des ENIAC-Computers (10)



Yes, of course we made **coding errors**. Most of these were the usual blunders that every programmer lives with; some were mistakes arising from subtle idiosyncrasies in the command structure of ENIAC. Of all the difficulties that plagued us, however, by far the most baffling and certainly the most disconcerting was the assignment of scale factors for the individual ENIAC operations. These factors intruded because ENIAC was strictly a fixed-point machine, each register holding a fixed-point decimal number with 10 digits and sign. The purpose of the scale factors was to prevent overflow or underflow or simply excessive loss of significance in each of the various ENIAC operations. This was accomplished by normalizing every array to the interval -1 to +1. Some of the scale factors needed to do this had to be found by trial and error.”

[George Platzman: The ENIAC Computations of 1950 – Gateway to Numerical Weather Prediction. Bulletin of the American Meteorological Society 60(4), April 1979, 302-312]



Lochkartenmaschinen für die Datenein / -ausgabe



# Programmierung des ENIAC-Computers (11)

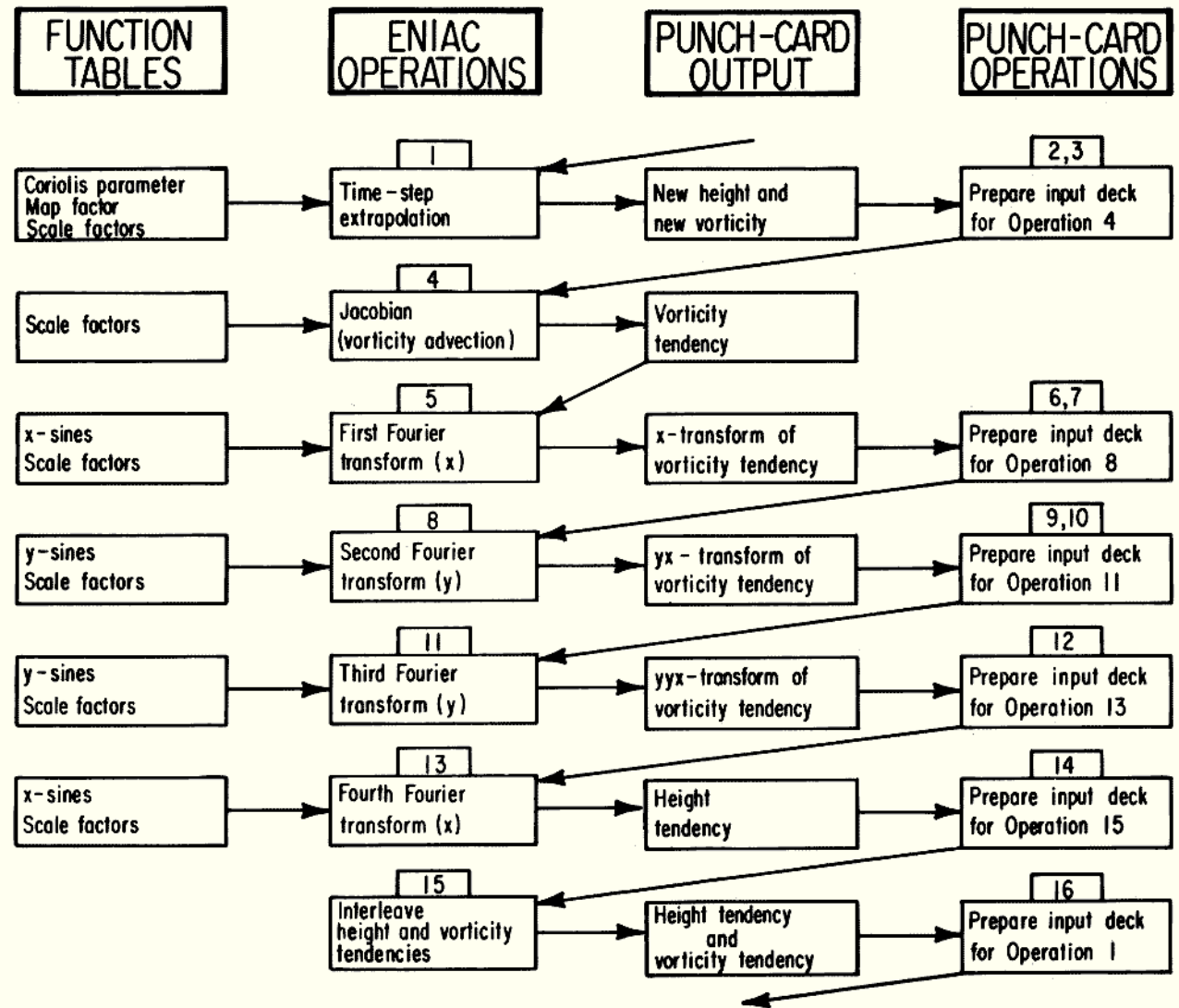
Da die ENIAC keinen RAM-Speicher besass (und es nur wenige Akkumulatoren gab, die als Register genutzt werden konnten), musste zum Speichern von Zwischenergebnissen auf Lochkarten (als externe Speichermedien) zurückgegriffen werden. Der in einem „Run“ einer Zwischenberechnung erzeugte Lochkartenstapel konnten dann ausserhalb der ENIAC (manuell unterstützt) mit den klassischen Lochkartenverarbeitungsgeräten der seinerzeitigen Datenverarbeitungstechnik bearbeitet (z.B. sortiert oder gefiltert) werden, bevor er als Eingabe für den folgenden ENIAC-Run diente. Für eine numerische Wettervorhersage wurden insgesamt etwa 25000 Lochkarten verwendet, der grösste Teil der gesamten „Rechenzeit“ wurde für ihre Manipulation benötigt.

Von Neumanns Wetterprognosemodell, das auf der ENIAC gerechnet wurde, bestand aus einem 18x15-Gitter, das die USA mit einer Maschenweite von 736 km überdeckt. („Unfortunately a smaller interval would too greatly have reduced the size of the forecast area, for the total number of grid points was restricted by the limited internal memory capacity of the Eniac“ heisst es im Ergebnisbericht.) Die 24-Stunden-Prognose wurde in Zeitschritten von einer Stunde Simulationszeit berechnet. Für jeden Zeitschritt mussten für jeden der 270 Gitter-Datenpunkte jeweils 16 „Operationen“ durchgeführt werden; Platzman schreibt dazu:

*Six of these were ENIAC operations, which did all the arithmetic, and 10 were punch-card operations, which carried out the various rearrangements and preparations of data required by the ENIAC operations. Each ENIAC operation produced an output deck through the card punch, and this was used to create other decks by means of reproducing, collating, and sorting operations. The interplay between electronic and mechanical components is nicely illustrated by what in the weather forecast problem was called Operation 4, calculation of the Jacobian—in other words of the vorticity advection.*

# Programmierung des ENIAC-Computers (12)

*At each grid point a Jacobian was calculated after reading three cards. In this process the card reader made three quite audible clicking noises and then a slightly longer interval followed during which ENIAC did the Jacobian multiplications and additions. The speed of this rhythmic operation was such that one could easily do a three-step jig to the clicking noises of the card reader. Indeed, for some now-forgotten reason we were greatly relieved when at each time step Operation 4 finally made its presence known audibly through the card reader.*



The 16 operations in each time step of the first numerical weather forecast

# Programmierung des ENIAC-Computers (13)

<https://digital.library.temple.edu/digital/collection/p15037coll3/id/61000/rec/7>



<https://digital.library.temple.edu/digital/collection/p15037coll3/id/61000/rec/7>



Links: Lochkartenleser für die Dateneingabe; rechts: Offline-Gerät zum Ausdrucken der Ergebnisdaten, die von Eniac als Folgen gestanzter Lochkarten erzeugt wurden.





“Set up of a problem on the ENIAC” mit Schaltkabeln, Schaltereinstellungen und Lochkarten

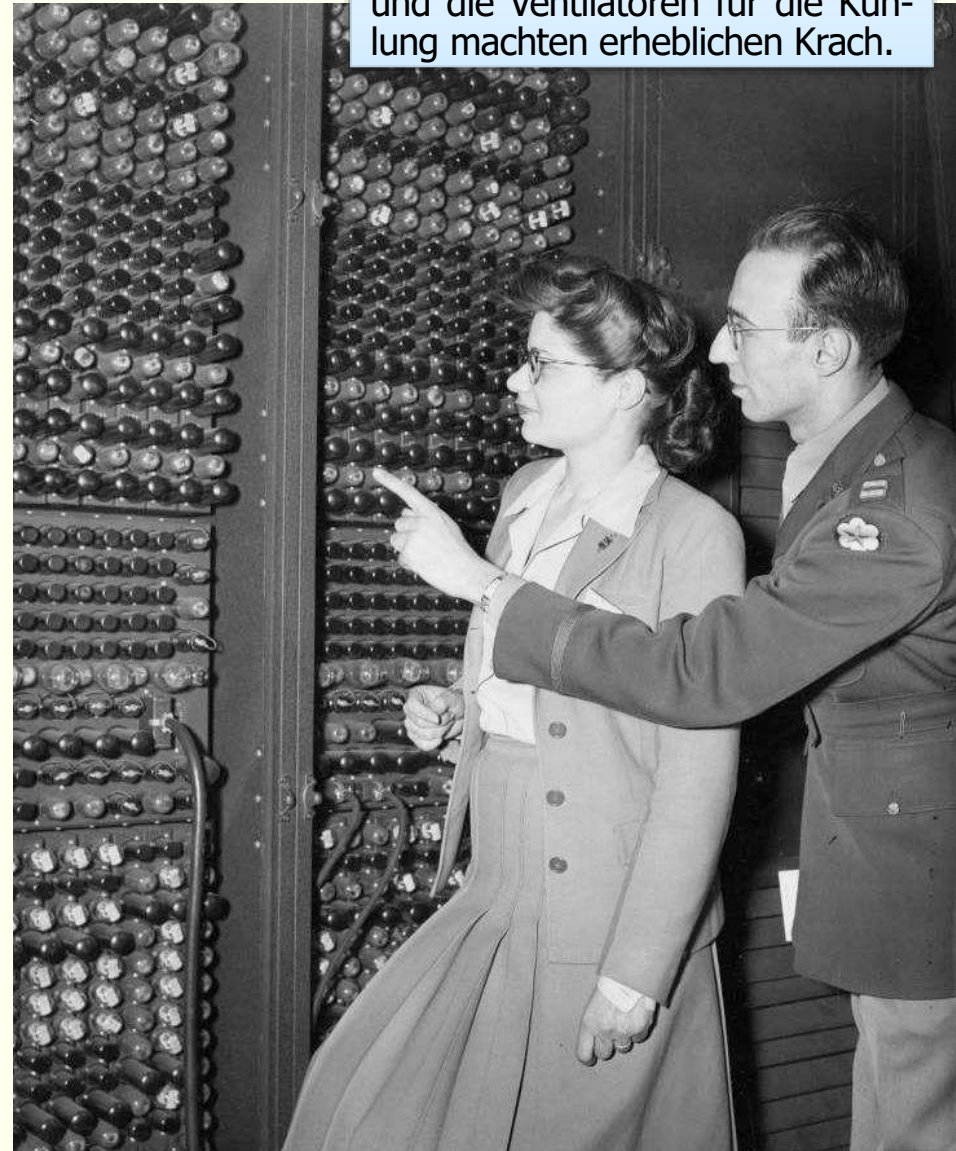
**Video-Empfehlung:** Women technicians work on the ENIAC: [www.youtube.com/watch?v=to-50Kydrj4](http://www.youtube.com/watch?v=to-50Kydrj4). Und: [www.youtube.com/watch?v=bGk9W65vXNA](http://www.youtube.com/watch?v=bGk9W65vXNA) (“This film shows the machine in operation as well as the designers and some of the women programmers working the wiring panels and managing input and output via punch card machines.”) Seinerzeit sprach man (noch ohne political correctness) von den “Eniac girls”.

# Keine „Refrigerator Ladies“!

*In her research Kathy Kleiman stumbled upon a famous black-and-white photo of the first all-electric computer. Published in major newspapers across the country in 1946, the caption identified the men in the image, but no one else. Kleiman was perplexed. Why were the men in the photo the only ones identified? Who were the women? She took her questions to a historian of computing, but it turned out no one knew who the women were. “I was told they were models, ‘Refrigerator Ladies’, posing in front of the machine to make it look good,” Kleiman says. This was a common marketing tactic used to sell kitchen appliances like refrigerators at the time. [Liz Huang, <https://builttoadapt.io>]*

Es handelte sich aber tatsächlich um die sechs „human computers“, die an der [Moore School of Electrical Engineering](#) der [University of Pennsylvania](#) als Operateurinnen die Maschine betreuten; die sechs später so genannten „[Eniac girls](#)“: Frances ‘Fran’ Bilas, Frances Elizabeth ‘Betty’ Snyder, Ruth Lichterman, Betty Jean Jennings, Marlyn Wescoff und Kathleen ‘Kay’ McNulty.

Racks mit jeweils ca. 550 Elektronenröhren; im Betrieb erzeugte Eniac dadurch eine grosse Hitze und die Ventilatoren für die Kühlung machten erheblichen Krach.





# „Refrigerator Ladies“?

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden grosse Anstrengungen unternommen, die USA in der Fläche zu elektrifizieren. Sowohl Energielieferanten als auch Haushaltsgerätehersteller witterten einen grossen und lukrativen Markt. Das wichtigste Vehikel dafür war der Kühlschrank: 1930 hatten erst 9% der amerikanischen Haushalte ein Gerät, 10 Jahre später waren es schon 56%. Die Preise fielen durch Fortschritte in Technik und Herstellung sowie durch Skaleneffekte der Massenproduktion stark; nun konnten sich auch Mittelklassefamilien ein solches „Luxusprodukt“ leisten und sich so scheinbar einen Lebensstil der „high society“ ermöglichen. Die Werbung setzte in massiven Anzeigekampagnen auf genau dieses Begehren (in der Zielgruppe „white middle-class women with young children, married to men in white-collar jobs, living in single-family homes“): Kühlschränke, welche nun abgerundete Ecken und geschwungene Formen hatten, wurden auf Fotos oder Werbegrafiken mit dazu passenden Models abgebildet, die den Prototyp einer sorgenden aber glückserfüllten Ehefrau darstellten – die Models sollten, gut sichtbar, einen Ehering tragen. Man nannte sie, etwas despektierlich, „refrigerator ladies“ – ein Begriff, der später auch losgelöst vom Kühlschrank für Vorführdamen verwendet wurde, die ansonsten nüchterne technische Geräte präsentierten – so auch Computer.

*Streamlined refrigerators – sensuous curves and precious surfaces. You will be proud to own and use your Electrolux. Your visitors will envy you as they admire it.*





# „The ENIAC six“

« The six were selected from a group of nearly 100 women employed by the Army to work at the Moore School. They had been recruited from colleges in the area as “computers” to perform ballistic computations.



Kathleen “Kay”  
McNulty  
[Mauchly Antonelli]  
1921–2006



Frances Elizabeth  
“Betty” Snyder  
[Holberton]  
1917–2001



Ruth Lichterman  
[Teitelbaum]  
1924–1986



Frances “Fran” Bilas  
[Spence]  
1922–2012



Marlyn Wescoff  
[Melzer]  
1922–2009



Betty Jean Jennings  
[Bartik]  
1924–2011

They were a typical squad thrown together by the war: [Wescoff](#) and [Lichterman](#) were Jewish, [Snyder](#) a Quaker, [McNulty](#) an Irish-born Catholic, and [Jennings](#) a lapsed Church of Christ Protestant. “We had a wonderful time with each other [...] we really liked one another.” In the summer of 1945, the six women were sent to Aberdeen Proving Ground to learn how to use IBM punch cards and wire up plug boards. “We worked together, lived together, ate together, and sat up until all hours discussing everything.” Since they were all single and surrounded by a lot of single soldiers, there were multiple memorable romances and affairs nurtured over Tom Collins cocktails in the booths of the officers’ club. After six weeks of training, the women consigned their boyfriends to memory archives and returned to Pennsylvania.

## „The ENIAC six“ (2)

“Somebody gave us a whole stack of blueprints, and these were the wiring diagrams for all the panels, and they said, ‘Here, figure out how the machine works and then figure out how to program it,’” explained McNulty. That required analyzing the differential equations and then determining how to patch the cables to connect to the correct electronic circuits. [...] “What we were doing then was the beginning of a program,” she said, though they did not yet have that word for it.

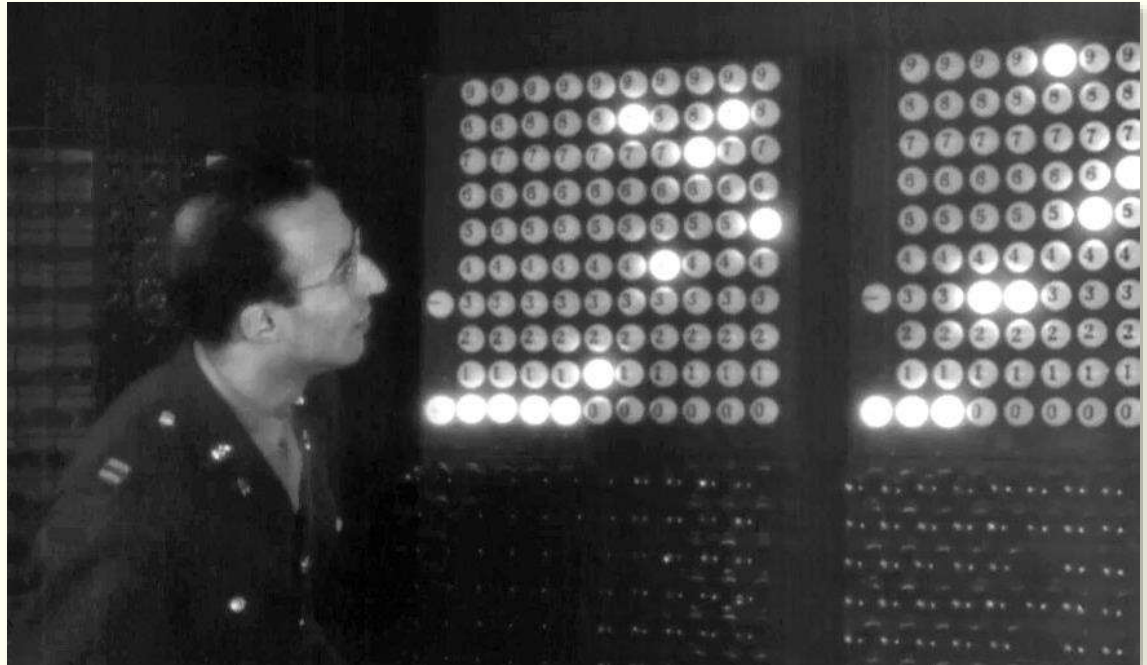
Because it was being used for atom bomb calculations and other classified tasks, ENIAC was kept secret until February 1946, when the Army and Penn scheduled a gala unveiling for the public and the press. Herman Goldstine decided that the centerpiece of the ENIAC presentation would be a demonstration of a missile trajectory calculation. So two weeks in advance, he invited Jean Jennings and Betty Snyder to his apartment and, as Adele served tea, asked them if they could program ENIAC to do this in time.

The night before the demonstration was Valentine’s Day, but despite their normally active social lives, Snyder and Jennings did not celebrate. “Instead, we were holed up with that wonderful machine, the ENIAC, busily making the last corrections and checks on the program,” Jennings recounted. There was one stubborn glitch they couldn’t figure out: The program did a wonderful job spewing out data on the trajectory of artillery shells, but it just didn’t know when to stop. [Even after the shell would have hit the ground, the program kept calculating its trajectory, \[...\]](#) “I woke up in the middle of the night thinking what that error was. I came in, made a special trip on the early train that morning”. She flipped the requisite switch and the glitch was fixed.

At the demonstration, ENIAC was able to spew out in 15 seconds a set of missile trajectory calculations that would have taken human computers several weeks. Mauchly and Eckert, like good innovators, knew how to put on a show. The tips of the vacuum tubes in the ENIAC accu-

## „The ENIAC six“ (3)

mulators, which were arranged in 10-by-10 grids, poked through holes in the machine's front panel. But the faint light from the neon bulbs, which served as indicator lights, was barely visible. So Eckert got Ping-Pong balls, cut them in half, wrote numbers on them, and placed them over the bulbs. As the computer began processing the data, the lights in the room were turned off so that the audience would be awed by the blinking Ping-Pong balls, a spectacle that became a staple of movies and TV shows. As the



trajectory was being calculated, numbers built up in the accumulators and were transferred from place to place, and the lights started flashing like the bulbs on the marquees in Las Vegas. »

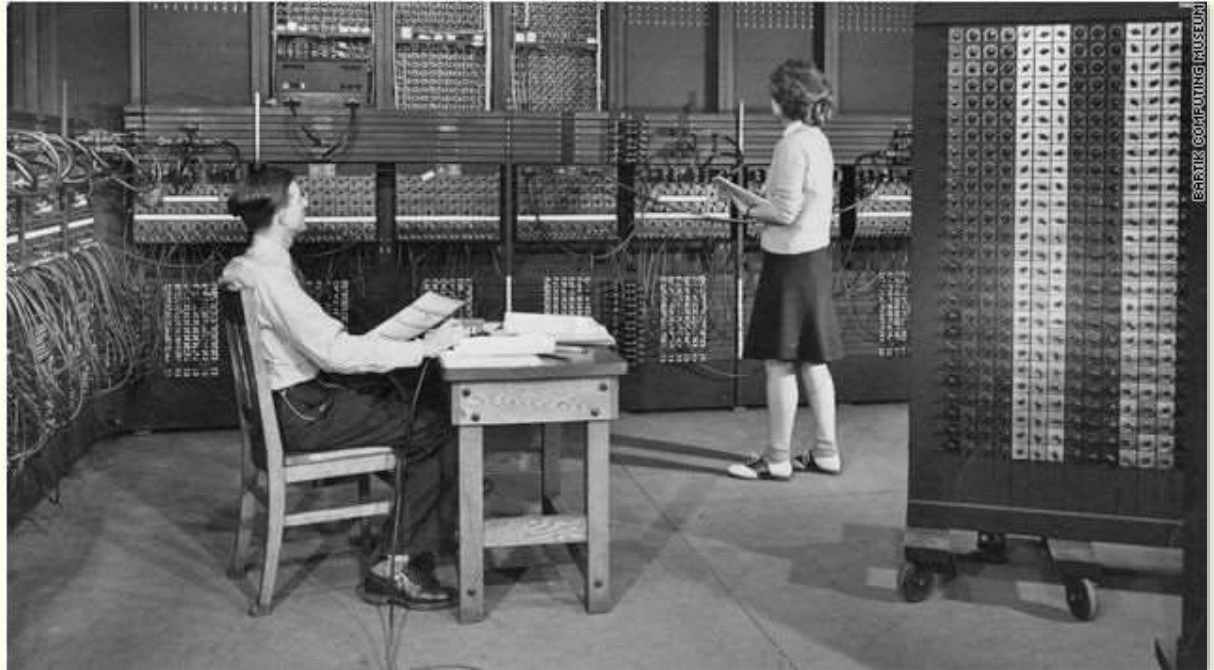
[Aus: "The Innovators" von Walter Isaacson]

„1947 wurde der ENIAC-Rechner auf das Militärgelände nach Aberdeen umgesetzt; [Marilyn Wescoff](#) und [Elizabeth Jean Jennings](#) (später [Jean Bartik](#)) zogen nicht mit um. [Betty Snyder](#) wechselte wie zuvor schon Jean Bartik zur neu gegründeten Firma Eckert Mauchly Computer Corporation, wo sie beide in der Softwareentwicklung berühmt wurden. [Kathleen McNulty](#) verließ Aberdeen 1948 und heiratete John Mauchly. Sie forschte in den folgenden Jahren mit ihm weiter in der Computertechnik. [Frances Bilas](#) und [Ruth Lichterman](#) heirateten 1947 bzw. 1948 ENIAC-Ingenieure und wurden Hausfrauen.



# „The ENIAC six“ (4)

Mit dem Wechsel nach Aberdeen übernahm ein neues Programmiererteam die Arbeit am ENIAC, die noch weitere acht Jahre dauerte. Es bestand etwa zur Hälfte aus Männern und Frauen. In Aberdeen erhielten die Programmiererinnen mit akademischen Abschlüssen erstmals ein entsprechendes Gehalt. Während ihrer Tätigkeit als ‚Computer‘ waren alle Frauen (ob mit Hochschulabschluss oder sogar mit Promotion) als ‚angelernt‘ eingestuft worden und entsprechend niedrig entlohnt.



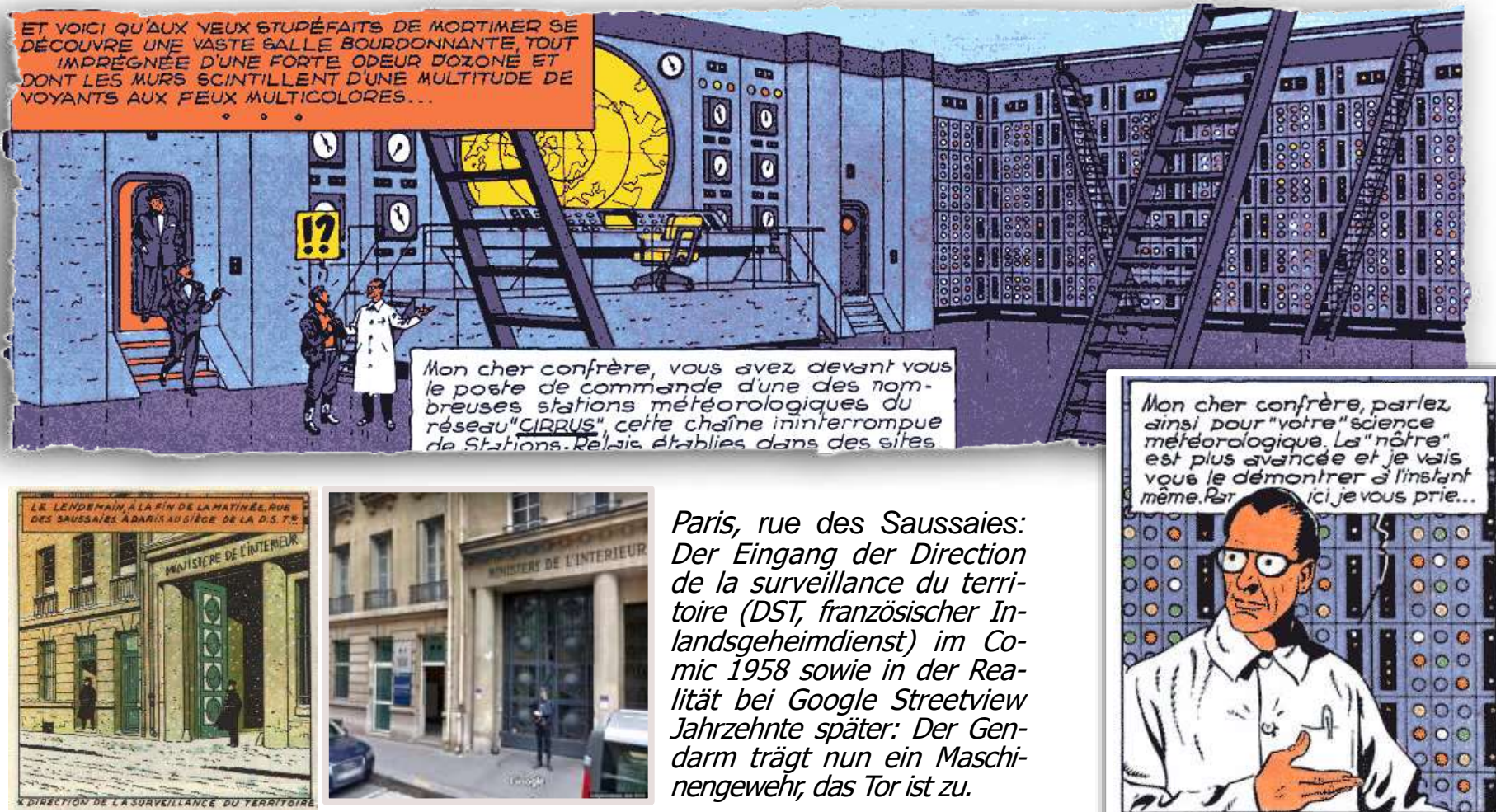
*Februar 1946: Senior Engineer Arthur Burks mit Jean Jennings Bartik beim Überprüfen einer Eniac-Berechnung.*

An der Programmierung beteiligten sich noch zwei andere Frauen intensiv: Die Mathematikerin Adele Goldstine sowie Klare von Neumann (Ehefrauen vom Projektleiter Herman Goldstine und vom Mathematiker John von Neumann, der seit 1944 beratend in das ENIAC-Projekt involviert war). Adele Goldstine war die alleinige Autorin der umfangreichen ‚Technischen Beschreibung des ENIAC‘, die 1946 erschien.“

[Aus: [www.frauen-informatik-geschichte.de/index.php-id=63.htm](http://www.frauen-informatik-geschichte.de/index.php-id=63.htm) (gekürzt)]

# Wettercomputer im Comic

Auch in die Comics zieht der Wettercomputer in den 1950er-Jahren ein. Hier eine Szene aus dem Album „S.O.S. Météores“ der „Blake et Mortimer“-Abenteurererien von Edgar P. Jacobs:





# Ein Supercomputer für die Meteorologie?



1966: Die CDC 3800 im Meteorologischen Rechenzentrum des DWD

Abteilung zu deren Nutzen all diese Bemühungen gedacht waren, stiess er auf Unverständnis und wurde als Utopist angesehen. Auch als er 1963 selbst Leiter der Forschungsabteilung wurde, als die benachbarten grösseren Dienste sich bereits einen Rechner beschafft und mit der Durchführung routinemässiger barotroper Vorhersagerechnungen begonnen hatten, gelang es ihm immer noch nicht, die Dienstleitung von der Notwendigkeit einer Maschinenbeschaffung zu überzeugen.“ „Der Spiegel“ schrieb dazu 1958: „Die Deutsche Forschungsgemeinschaft überlegt schon, ob sie eine solche Maschine kaufen soll. Der Bundesfinanzminister dagegen sagt: ‚Geld kriegt ihr erst, wenn sich die Sache lohnt.‘ Und um sein Modell durchzurechnen, braucht Dr. Hinkelmann immer noch 8 Stunden. Er muss auf 3 Stunden kommen, wenn die Sache praktisch einen Wert haben soll.“

Vor Mitte der 1960er-Jahre stiess der Gedanke an **numerische Wettervorhersagen** sowie die Nutzung von Computern in der Meteorologie zunächst noch auf wenig Akzeptanz. In einem Artikel über den beim **Deutsche Wetterdienst (DWD)** tätigen Meteorologen Karl Heinz Hinkelmann erinnert sich Fritz Wippermann von der TU Darmstadt: „...die steten Bemühungen um die Beschaffung einer eigenen Rechenmaschine durch den Deutschen Wetterdienst. In dieser Beziehung waren es für Karl Heinz Hinkelmann Jahre einer grossen Frustration. Alle Vorstösse scheiterten an einer unverständigen und wenig einsichtigen Dienstleitung; bei seinen Meteorologenkollegen, vor allen denjenigen der synoptischen



F. H. Bushby vom Meteorological Office in Bracknell, England, gibt 1986 einen Bericht von Winhart Edelman vom Deutscher Wetterdienst über [Karl Heinz Hinkelmann](#) wieder, der seiner Meinung nach die Anfangszeit der Erforschung numerischer Prognosemöglichkeiten gut charakterisiert:

Hinkelmann felt the necessity to incorporate the vertical structure of the atmosphere by more than a second level. Beginning in late Autumn of 1952 he tried to make forecasts using a three-dimensional quasi-geostrophic model with 3 and later with 4 levels. However, there was no computer available! How to solve the task? [...] The place of the story was narrow rooms under the sloping roof of an old hotel, full of cigarette smoke, a blackboard completely covered with hieroglyphics, and chalk dust everywhere. Hinkelmann's mini-group consisting of one or two students and two girls (among them the now-President of the German Weather Service and his wife) started with the following procedure: After the initial analyses had been manually prepared by the synoptic division, the vorticity and the Jacobians of the quasi-geostrophic model were evaluated by graphical methods – a big lot of maps and a work of several days! Then grid point values had to be interpolated, read out and written very small on a huge paper covering a whole blackboard for the main step of the work, namely the solution of the three dimensional elliptic equations for the tendency by relaxation. One girl read out the figures of the difference operator to the other, who sat at a very heavy noisy, slow mechanical calculator. She called the result back to the first girl. So it went on from grid point to grid point, from row to row. After a couple of hours, the girls changed their places, after a couple of days they had done an iteration for the whole field, and after several weeks they got figures we assumed to be the solution of the elliptic equation. The tendency was converted back to a map and graphically added to the initial field, giving us a 12-hr forecast. Then the entire procedure was repeated to give us a 24-hr prediction. The result of some months of stupid work did not look totally unreasonable. We never dreamt that 30 years later all this computation would be much better performed within a few seconds.

Aus: F. H. Bushby: A History of Numerical Weather Prediction. Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 64A (1986) p. 1-10

# Das Meteorologische Rechenzentrum des DWD

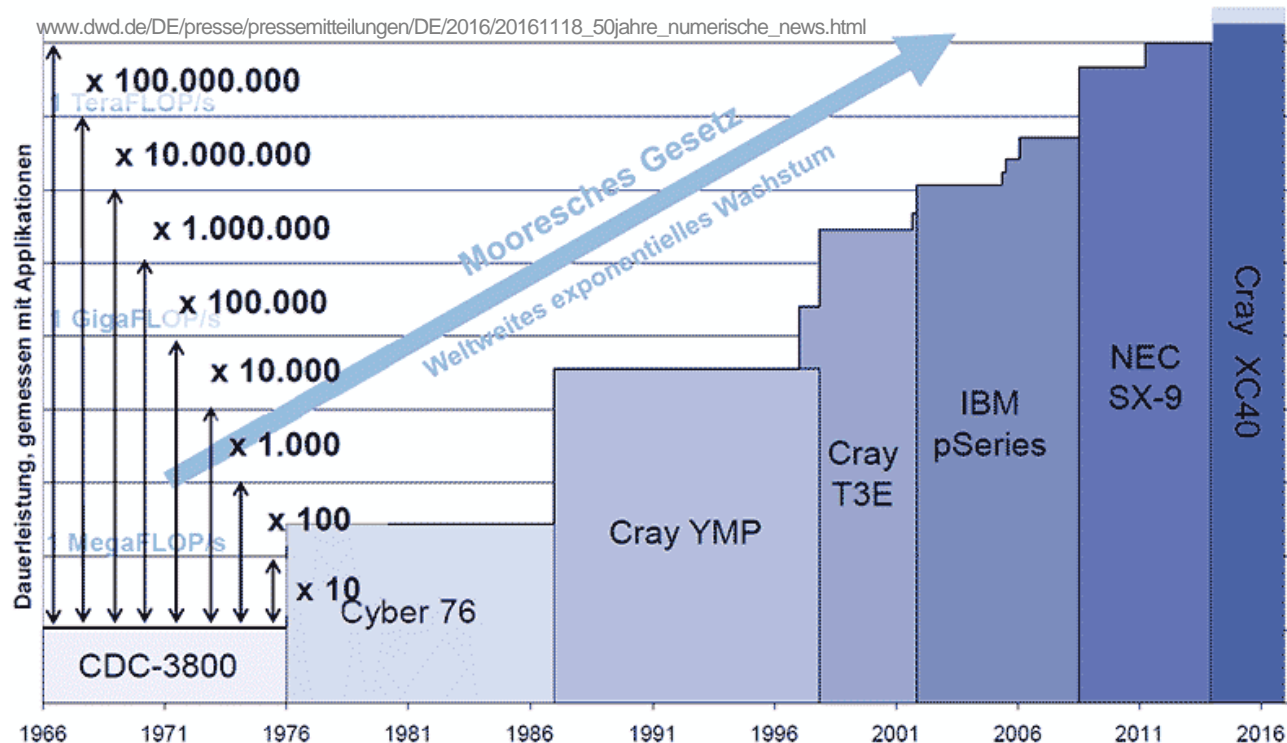


1966 / 67 wurde dann beim DWD ein Doppelsystem 3400 / 3800 von CDC installiert. Die 3400 diente Vorarbeiten und als Ausfallreserve. Die 3800 war ein Hochleistungsrechner für numerische Aufgaben (700 tausend Multiplikationen pro Sekunde), aus diskreten Transistoren aufgebaut mit 128 kB Hauptspeicher. Die externe Datenspeicherung erfolgte auf je acht Magnetbandeinheiten, die Eingabe der Assembler-Programme erfolgte mit Lochkarten. Die Wetter-

meldungen liefen per Fernschreiber ein und wurden mit einem Lochstreifenleser in das System eingegeben. 1978 wurde das System durch eine CDC Cyber 76 abgelöst, die mehr als zehn Mal schneller war. [Text- und Bildquelle: Klaus Wege: Als das Wetter rechnen lernte. Kultur & Technik 02/2008, S. 26-31.]

# Wettercomputer beim DWD

Winhart Edelmann berichtete, wie es in der Anfangszeit der operationellen Nutzung der numerischen Wettervorhersage beim Deutschen Wetterdienst gelegentlich zuging: „Anstatt einer vernünftigen Vorhersage kam das absolute Zahlenchaos heraus. Das numerische Rechenverfahren war aus irgendeinem finsternen Grund instabil geworden, und der musste schnellstens gefunden, beseitigt und auch für die Zukunft ausgeschlossen werden. Dann klingelten die Telefone, mit Vorliebe an Sonn- und Feiertagen, oder früh zwischen 3 und 4 Uhr. Der ‚Grosse Krisenstab‘ wurde einberufen; die Köpfe rauchten; kriminalistischer Spürsinn war vonnöten, bis die grosse Erleuchtung über eine meist sehr kleine Ursache kam.“



Die Graphik aus dem Jahr 2016 zeigt auf der halblogarithmischen Skala die laufende Zunahme der Rechenleistung beim Deutschen Wetterdienst. Z.B. brachte die Cyber 76 im Jahr 1977 eine mehr als 20-fache Steigerung der Rechenkapazität. Das Modell wurde von 6 auf 9 Flächen in der Vertikalen aufgestockt, das Gitternetz von 400 auf 250 km verfeinert. Dies verbesserte die Genauigkeit, und damit liess sich die Vorhersagezeit von 2 auf 6 Tage steigern.



# Wettercomputer beim DWD (2)



NEC SX-9, ab 2009

lösung, das heisst der Abstand der Orte, für die eine Vorhersage angefertigt wird, von anfangs 381 Kilometern auf heute 13 Kilometer beziehungsweise 2.8 Kilometer bei rund 90 vertikalen Schichten verfeinert werden. Global sind das zusammen rund 265 Millionen Modellpunkte. Vorhersagen werden inzwischen achtmal täglich gerechnet. [Nov. 2016, [www.op-online.de/offenbach/](http://www.op-online.de/offenbach/)]

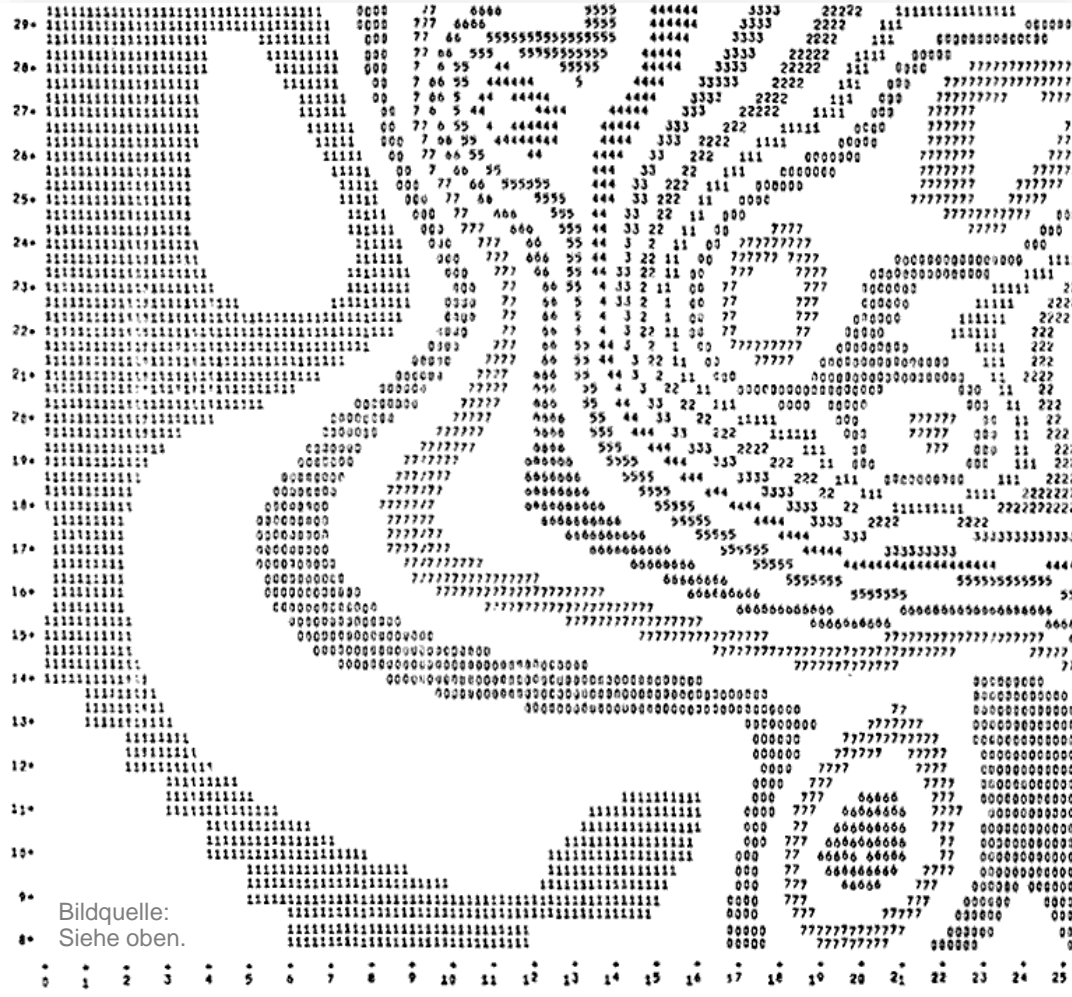
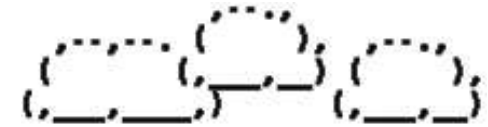
Der DWD begann im Oktober 1966 in Offenbach mit dem „barotropen Ein-Schichten-Modell“. Der erste Rechner leistete für damalige Verhältnisse unglaubliche 700 000 Multiplikationen in der Sekunde – heute ist das unvorstellbar langsam. Während die Rechenleistung im DWD seit 1966 um mehr als das 100 millionenfache gestiegen ist, konnte gleichzeitig die Modellauf-



Cray XC40, ab 2013

# Wetterkarten als

*ASCI ART*



Die Rechenleistung reichte in den 1960er-Jahren aus, um mit einem aus heutiger Sicht vergleichsweise einfachen Modell der Atmosphäre 2 Mal am Tag eine Vorhersage zu machen. Die Genauigkeit für eine 24-Stundenprognose entsprach dabei der Genauigkeit heutiger 7-Tagesprognosen. Anfangs gab es jedoch weder Bildschirme noch Zeichengeräte (Plotter) zur Ausgabe von Wetterkarten. Man behalf sich mit „Zibrakaten“, die auf einem Zeilendrucker produziert wurden: Der Verlauf gewünschter Isolinien (z.B. Isobaren) wurde durch die Grenze zwischen Freiflächen und dunklen (mit Ziffern besetzten) Flächen dargestellt. Im Beispiel: Karte für den 2. 11. 1972, Ausschnitt Atlantik-Europa, mit einem Tief rechts unten über der Iberischen Halbinsel.



# Numerische Wettervorhersage in England

In Grossbritannien wurden vom „Met Office“ erste Experimente (mit einem  $12 \times 8$ -Gitter bei einer Auflösung von 260 km und Zeitschritten von einer Stunde) Anfang der 1950er-Jahre zunächst auf dem [EDSAC-Computer in Cambridge](#) durchgeführt; anschliessend wurde der modernere [Ferranti Mark 1 der Manchester-Universität](#) genutzt. Mavis Hinds beschrieb im *Meteorological Magazine* von 1981 die Pionierzeit so:

“Since we needed the computer for several hours at a stretch, most of our usage was at night and for some years we used the machine for two nights each alternate week. We stayed at a nearby commercial hotel, now happily demolished. Sleeping during the day was made difficult by the shouting of the cleaners and the insistence of the electricity-meter emptier, and if we returned during the night the chorus of snores through the thin walls was unbelievable. More readily available treats were the sight of sunrise over Manchester from the roof near the computer room or the exhilaration of coping with an old-fashioned Manchester smog in which the buses were led by a man on foot holding a flare. It was sometimes necessary to have one member of the party with sufficient athletic prowess to scale the wrought-iron University gate in order to gain access to the computer building.”

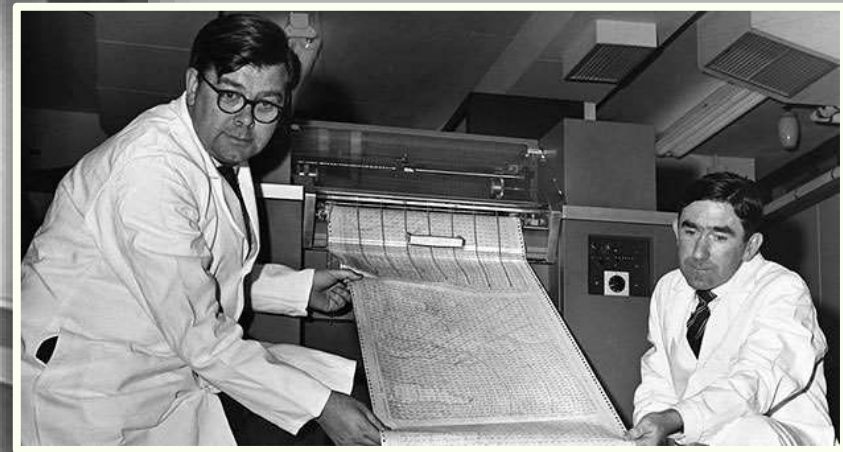


*Weather-forecast printer, Meteorological Office, 2 November 1965: Operators of the high speed line printer holding a length of forecast charts which the computer-fed machine produces at 1000 lines a minute.*



# Numerische Wettervorhersage in England (2)

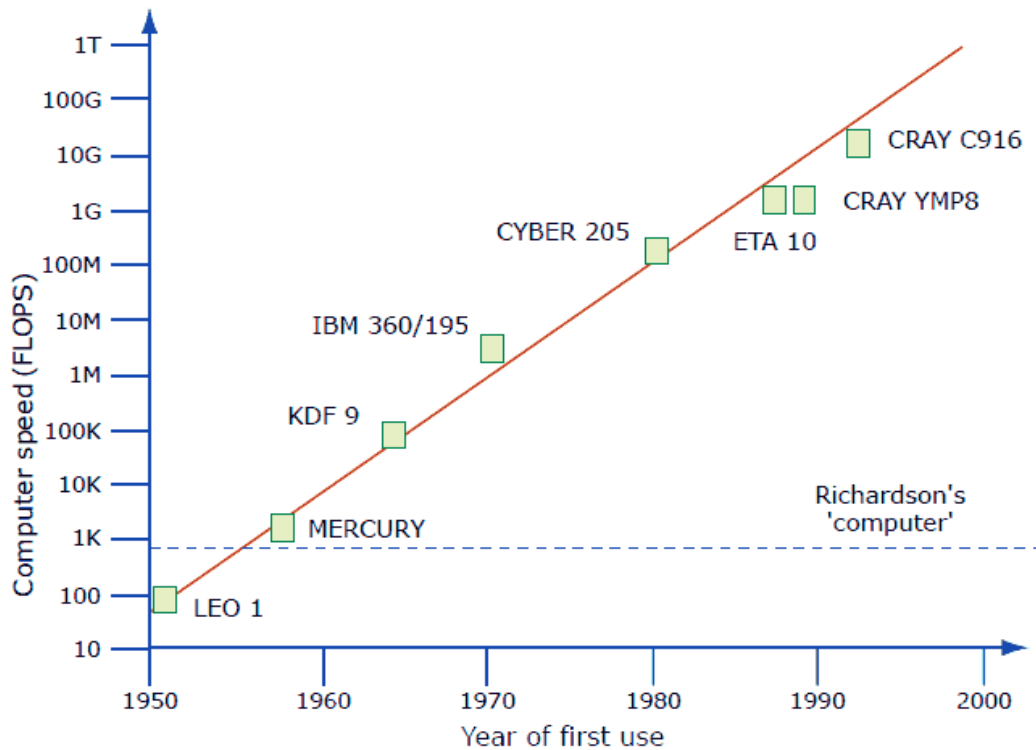
1959 erwarb das Met Office für weitere Experimente den ersten eigenen Computer, einen **Ferranti Mercury**, der den Namen „**Meteor**“ erhielt (mit 5000 Elektronenröhren und 300 FLOPs einer der seinerzeit leistungsfähigsten Rechner in England); 1965 dann einen transistorbasierten **KDF9-Computer** („**Comet**“) mit einer Leistung von 60 kFLOPs. Mit diesem wurde am 2. November 1965 im Beisein von Presse und Fernsehen die erste offizielle numerische Wetterprognose des Met Office erstellt, die sich glücklicherweise als sehr zutreffend herausstellte.



*There was much publicity for this event in the local and national press, with photographs of Dr B. J. Mason, Director-General, looking at output charts.*

*Grosse Abfallkübel für das Endlospapier, der Direktor in feinem Tuch, die Bedienmannschaft im Weisskittel*

# Machines Used by the Met Office



Year	Computer	Calculations per second
1959	Ferranti Mercury	3k flops
1965	English Electric KDF9	50k flops
1972	IBM 360/195	4M flops
1982	CDC Cyber 205	200M flops
1991	Cray Y-MP C90/16	10G flops
1997	Cray T3E 900/1200	430G flops
2004	NEC SX-6	2.0T flops
2006	NEC SX-8 and SX-6	5.4T flops
2009	IBM Power6 / Power 7	140T flops
2015	Cray XC40	16P flops

English Electric [KDF9](#) could output charts in both zebra form on a line printer and, later, on a pen plotter. The [IBM 360/195](#) computer, which used integrated circuits, had 250 kword of storage. The model was coded in IBM Assembler and constructed very carefully to exploit the capabilities of the 360/195. Model fields transferred to and from the fixed head disk I/O routines which completely overlapped with the arithmetic on the CPU so the machine never had to wait for data. The [Cyber 205](#) vector computer had 1Mword of memory and 200 Mflop capacity. In order to achieve maximum speed from this computer, the code was an amalgam of Assembler and Fortran. The [T3E](#) marked a change of architecture from vector to massively parallel processing, requiring substantial reprogramming.

# Machines Used by the Met Office (2)



Ferranti Mercury („Meteor“) in Dunstable, 1959



KDF9 („Comet“), 1965



IBM 360/195 in Bracknell, 1972



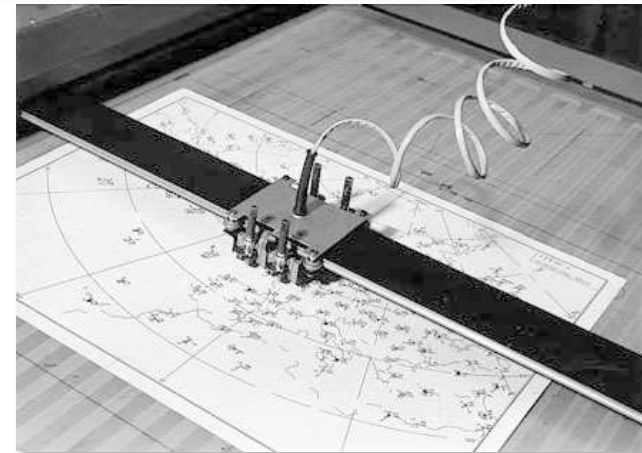
Cray XC40, 2015



# ...und in Frankreich 1960, 1968,...



In Frankreich lässt die Météorologie nationale von der Société nouvelle d'électronique einen speziell für ihre Bedürfnisse konzipierten Rechner fertigen, den KL 901 (Bild li. oben), der 1960 für Forschungsarbeiten in Betrieb genommen wird (ca. 8800 Elektronenröhren, 200 kHz Taktfrequenz). 1968 folgt für den produktiven Betrieb eine CDC 6400 von Control Data (Bild re. oben), mit der täglich die numerischen Prognosemodelle berechnet werden und an die auch ein Kartenplotter angeschlossen ist.



# ...1993: Cray-Supercomputer

*La salle de calcul de Météo-France, à Toulouse, en 1993. Au premier plan, l'ordinateur «Cray 2». Au second plan, l'ordinateur «Cray C98».*



*Deux prévisionnistes de Météo-France devant leur station de travail.*



# Cray-Supercomputer – auch an der ETH Zürich



Patrick Burkhalter (Ergon Informatik) & Friedemann Mattern an der Sitzbank des ausrangierten Cray-Computers im CAB-Gebäude der ETH Zürich (Globe-Magazin, Juni 2017)

Der über 5 Tonnen schwere Hochleistungsrechner Cray X-MP galt Mitte der 1980er-Jahre als einer der schnellsten Computer der Welt. Circa 15 Millionen Dollar kostete er damals. Die Anschaffung

des Modells Cray X-MP/28 (64 MB RAM, zwei 118 MHz Prozessoren) im Jahr 1988 markierte den Ausgangspunkt für das Engagement der ETH Zürich, auch im Bereich des Hochleistungsrechnens an vorderster Front zu sein. Der gelbe Riese dient heute als Erinnerung an die Fortschritte in der Informatik und bietet sich zudem als bequeme Sitzgelegenheit an.



# Farb-TV und Digitalisierung machen Wetterprognose zum **Entertainment** – mit Weather Girls & Boys



Numerische Wettermodelle werden ab den 1990er-Jahren weitgehend automatisch mit aktuellen Daten gefüttert – die Prognosekunst ist so einfacher und die Wetterkarte sowieso computergeneriert. Fast wichtiger als die Vorhersage ist nun die Frage, von wem sie präsentiert wird (und welcher Sponsor die Wetterleute kleidet).

Wettersvorhersage ist in der Schweiz bald auch keine Nachricht mehr, die auf Hochdeutsch präsentiert wird, sondern Infotainment, wo Mundart üblich ist.

# Das (vorläufige?) untere Ende an Niveaulosigkeit

Es ist die **Automatisierung**, getrieben durch die **Digitalisierung**, welche die Berufsqualifikation der Wetter-„Presenter“ banalisiert – fachliches Know-how ist im Privat-TV nun entbehrlich.



„Die Syntax bockt, die Semantik stockt, doch das macht gar nichts. Wenn Claudia und Anja die Zuschauerbetreuung an der Kaltluftfront übernehmen, soll gute Laune aufkommen, egal, wie viel Graupel droht. Im Kampf um die Treue des Publikums entdecken die Fernsehstationen den **Unterhaltungswert des Wetterberichts**. Vor allem die Showprofis vom Kommerzfunk [...] nutzen den Platz zwischen Satellitenfilm und Computergrafik als Talentschuppen für neue Moderatoren. Vorbei die Zeiten von **Frau Dr. Karla Wege, der Klima-Mutter der Nation**, die jahrzehntelang im ZDF das Zeigestöckchen kühler Wissenschaftlichkeit hochhielt. Nun werben **fachlich unbedarfte** Wetter-Sirenen mit knappen Minis um Aufmerksamkeit.“ Der Spiegel, 16.03.1992



# Bluescreen- Technik

Mit der **Bluescreen-** oder **Blue-Box-Technik** kam in Form des virtuellen Studios ein weiteres Gestaltungselement hinzu, das die Wettermoderatoren noch effektvoller in Szene setzt.



Die Meteorologin Metinka Slater wollte gerade über Regen im Bundesstaat Iowa sprechen, als auf der grossen Wetterkarte hinter ihr das Fenster aufploppte, welches das **Windows-Upgrade anpreist**. „Microsoft empfiehlt das Upgrade auf Windows 10. Was soll ich tun?“, fragte die Moderatorin ihr TV-Publikum. [Spiegel Online, 29. 04. 2016]



# „Durchsichtige Vorschau – Kleid von Wetterfee wird zur Prognosekarte“



Heiterer Zwischenfall: Wetterfee Liberté Chan sagte das Wetter für den Raum Los Angeles an, als sich ihr Kleid scheinbar in Luft auflöste. Grund: Der weiße Stoff enthielt einen Hauch Grün, die Kamera hielt die Kleidung für einen Teil der Studiowand und zeigte die Wetter-Karte darauf an. Ein Kollege eilte herbei und half mit einem Sakko aus, das die Wetterfee über ihre Schultern legte.  
[www.youtube.com/watch?v=bSWgL9dxW7g](http://www.youtube.com/watch?v=bSWgL9dxW7g)

# Das Weather Girl als „Traumjob“?

Oh weh, was ist nur aus dem **Traum** des Idealisten Lewis Fry Richardson geworden?



The weather girl position is a **dream job** for a lot of women. You get to look great, styled for the camera, and have fun makeovers every season.

[www.dress-game.com/weather-girl.html](http://www.dress-game.com/weather-girl.html)

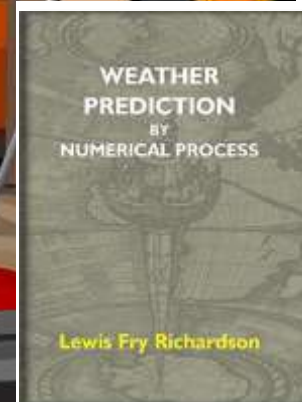


# Flashback

Oh weh, was ist nur aus dem **Traum** des Idealisten Lewis Fry Richardson geworden?



*"Perhaps some day in the dim future it will be possible to advance the computations faster than the weather advances and at a cost less than the saving to mankind due to the information gained. **But that is a dream.**"*  
Lewis Fry Richardson, 1922





Google

we

- wetter
- wetter zürich
- wechselkurs
- wetter schweiz

Zürich

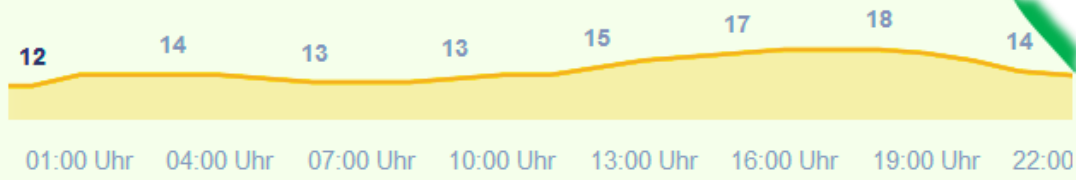
Mittwoch, 00:00  
Bewölkt

Niederschlag: 0%  
Luftfeuchte: 96%  
Wind: 3 km/h



12 °C | °F

Temperatur Niederschlag Wind



Day	Icon	Temp Range (°C)
Mi.	Cloud with rain	18° 10°
Do.	Cloud with sun	19° 8°
Fr.	Cloud with rain	23° 12°
Sa.	Cloud with rain	19° 10°
So.	Cloud with rain	19° 9°
Mo.	Sun	24° 9°
Di.	Cloud with sun	28° 13°
Mi.	Cloud with sun	25° 13°

Hiervon konnte Richardson noch nicht einmal träumen!

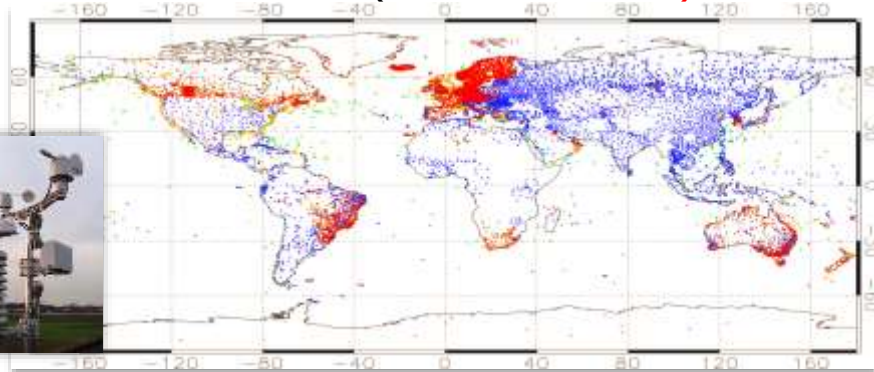


# Meteorologische Datenquellen

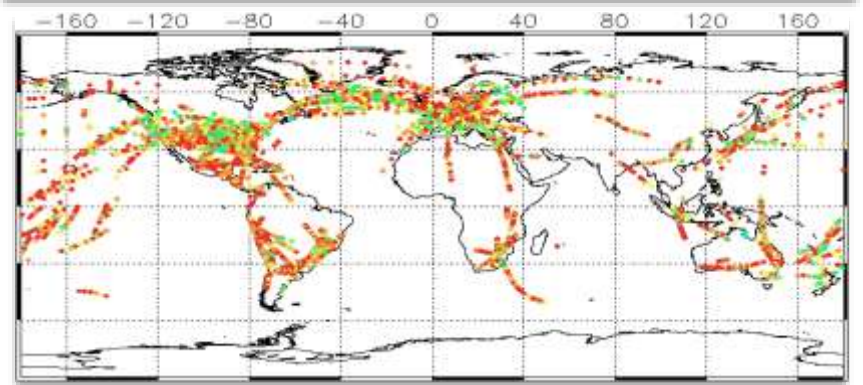
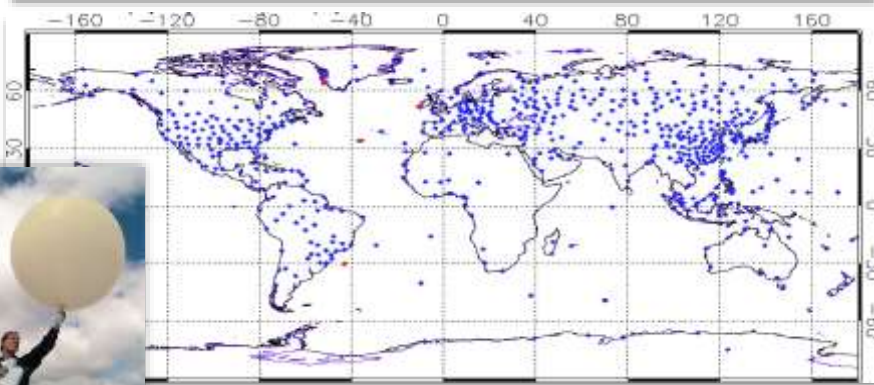
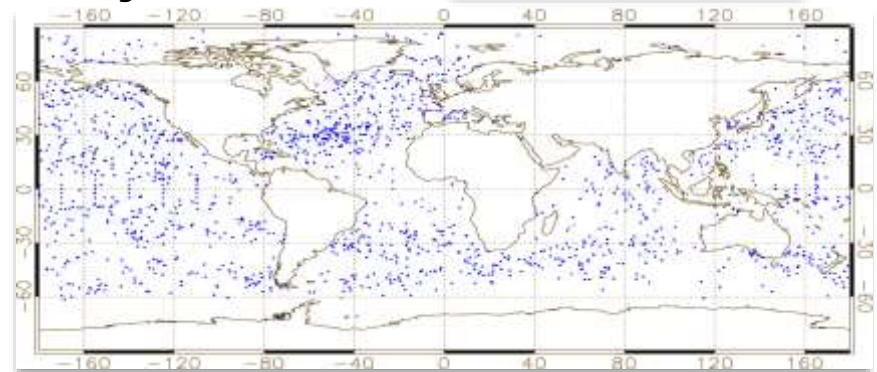
Neben den ca. 37000 **Wetterstationen** an Land sind auf dem Meer mehrere tausend **Schiffe** mit Wetterstationen an Bord unterwegs. Hinzu kommen rund 5200 automatische **Driftbojen**. Auch etwa 9200 **Verkehrsflugzeuge** liefern meteorologische Daten an die Wetterdienste. Mindestens zwei Mal täglich werden ferner weltweit an über 600 Stationen **Wetterballone** mit Radiosonden gestartet, die bis 30 km hoch aufsteigen und unterwegs Messwerte zum Boden funken.



## Wetterstationen (bemannt / unbem.)



## Bojen



Wetterballone mit Radiosonden

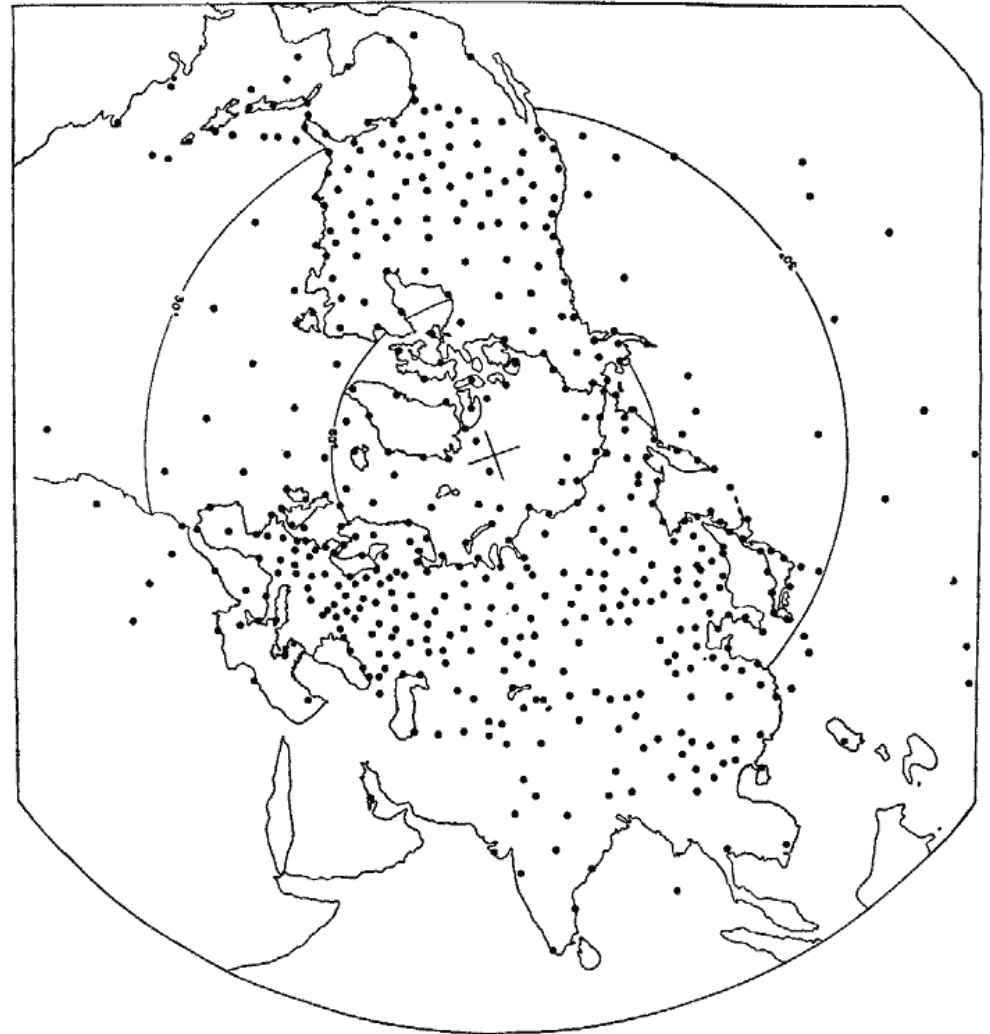
Flugzeuge (Reiseflughöhe)

# Lücken im Beobachtungsnetz

Eine Wetterprognose, die über ein paar wenige Tage hinaus geht, muss ein sehr **grosses geographisches Gebiet**, evtl. sogar die Atmosphäre des ganzen Erdballs, modellieren. Insbesondere in der Anfangszeit der numerischen Wetterprognose, den 1950er- und 1960er-Jahren, war dies aber kaum möglich, da die Datenlage ausserhalb der bewohnten Gebiete und der wirtschaftlich entwickelten Ländern sehr spärlich war.

Die Karte von **1960** zeigt die **weniger als 500 Wetterstationen** der nördlichen Hemisphäre, welche (typischerweise zwei Mal am Tag) der Joint Numerical Weather Prediction Group in Maryland Daten liefern; für ein Berechnungsgitter aus knapp 2000 Zellen war dies kaum ausreichend; die Situation war in der südlichen Hemisphäre noch schlechter. Anfang der 1960er-Jahre fragte man sich, ob „**indirekte**“ **Messungen durch Satelliten** helfen könnten, diese Lücken zu schliessen.

Aus: Norman A. Phillips: Numerical Weather Prediction, 1960





# Satelliten als meteorologische Datenquellen

Heute liefern geostationären **Wetter-satelliten** auf knapp 36000 km Höhe, wie z.B. die europäischen Meteosat-Systeme, **mehrmals pro Stunde** Daten; ferner umkreisen polarumlaufende Wettersatelliten in rund 850 km Höhe die Erde. Die Wettersatelliten messen die Strahlung der Erde und Atmosphäre in mehreren Spektralbändern des Infrarot- und Mikrowellenbereichs, woraus sich der **Zustand der Atmosphäre** (wie Temperatur und Feuchtigkeit) ableiten lässt und die **Temperatur des Erdbodens** bzw. der Meeresoberfläche gewonnen werden kann. Seit Ende 2017 werden aus aufeinanderfolgenden Satellitenbildern auch **Windinformationen** abgeleitet. Alleine beim Deutschen Wetterdienst entstanden im Jahr 2018 täglich ca. 17 Terabyte an Vorhersagedaten.

*Meteosat-Kontrollzentrum (EUMETSAT) in Darmstadt, 2002*



www.esa.int/spacemessages/Images/ (auch folgende 2 Slides)



*ESA/ESOC-Kontrollzentrum, 1969 / 2017*



# Weltwetterlage vom künstlichen Mündchen

Mitte des letzten Jahrhunderts waren meteorologische Satelliten noch Science-Fiction

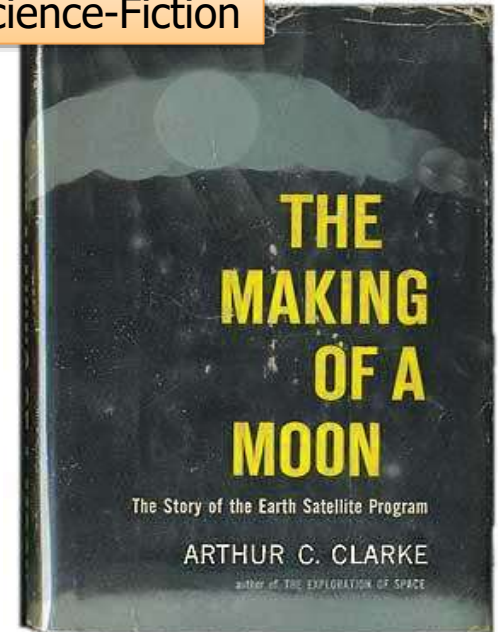
DER SPIEGEL 27/1954, 30.06.1954

## KÜNSTLICHES WETTER / FORSCHUNG

[...] Einen noch weiter reichenden Plan propagierte der Meteorologe [Harry Wexler](#) vom „U.S. Wetterbüro“ Mitte Mai auf einer vom Amerikanischen Museum für Naturgeschichte einberufenen Tagung für Weltraumfahrt.

Auf dieser Tagung hatte Dr. S. F. Singer von der Universität von Maryland seine Pläne für ein künstliches, unbemanntes [50-Pfund-Mündchen](#) vorgelegt, mit dem er die Eroberung des Weltraums einleiten will. Wexler plant, den künstlichen Satelliten, der in zwei Stunden die Erde in 320 Kilometer Höhe einmal umkreisen soll, so fliegen zu lassen, dass er beide Pole überquert. Wenn er nach zwei Stunden zur nächsten Runde ansetzt, hat sich unter ihm die Erde mit ihrer Atmosphäre um dreißig Grad weitergedreht. Nach 24 Stunden wäre der Singer-Satellit wieder an derselben Stelle und hätte die ganze Erdoberfläche abgeflogen.

Eine [riesige Fernsehkamera](#) soll vom künstlichen Mond aus ununterbrochen die Erdoberfläche beobachten. Ein Meteorologe auf der Erde sieht dann an einem Fernseh-Empfänger nach und nach alle Wolkenfelder, die um den Erdball schweben. Da für Hoch- und Tiefdruckgebiete, Kalt- und Warmfronten, Wirbelstürme und alle anderen Großwettererscheinungen ganz bestimmte Wolkenbilder charakteristisch sind, kann er die Weltwetterlage mühelos analysieren.



Science fiction author and futurist [Arthur C. Clarke](#) had been following Wexler's work on hurricanes in the 40s and wrote to Wexler to ask for his thoughts on Clarke's idea of using an artificial satellite to study weather patterns from space. This put Wexler on a path that would eventually lead to the launch of [TIROS-1](#) in 1960.

# Weather Spy – an Eye in the Sky

Der erste Wettersatellit (**TIROS-1**) war eigentlich nicht zur Wetterbeobachtung gebaut worden, sondern zum Zweck der militärischen Aufklärung. Der gebürtige Wiener und spätere Mitarbeiter der U.S. Army Research and Development Laboratories, Rudolf Stampfl (1926 – 1994), berichtet dazu: [“The APT on the Polar Orbiting Weather Satellites”, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 23(6), 820-830, 1987]

*The original intent, which was to see matters of reconnaissance value, could not be realized. The now famous Tiros (Television and Infrared Observation Satellite) was a much better **cloud mapper**, and thus TIROS 1, launched on **April 1, 1960**, became the first useful meteorological satellite.*

*When the satellite was in sight of a ground station and when the Earth was in daylight, **direct picture transmission** was possible; pictures of other locations were **recorded on reel-to-reel tape recorders** in the satellites and played back later. [...] Another ground station was located at an Air Force installation in Hawaii. We recognized very early that, to provide more accurate predictions, weather forecasting had to be done close to the time of the observation, and thus meteorologists were stationed at the two sights. Commands were sent manually to the satellites: when to take pictures, when to store them, when to read out pictures from the satellite either in the direct transmission mode or from storage from the tape recorder.*



PRIORITY  
KAENAA, SUNVAL  
TIROS I X JOHNSON  
FINNEY  
FOR ORBITOR3 KAENAA  
USE PROG B AUTOSTART  
NEW ALARM TIMES ARE  
A1 16 58 00 Z  
A2 OFF  
A3 OFF  
USE DCSI 2 PI 30'S ET F.OM  
ON DCSI SUPPRESS COMMAND TONE  
DROPOUTS CAUSING SHUTTER PULSES  
UNTIL AFTER YOU GET 235 MC  
VIDEO FROM BIRD BY MANUALLY  
SETTING PI TO OFF. WHEN  
YOU GET 235 MC, RESTORE PI  
TO SELECTED INTERVAL.

*Telex-Nachricht vom Kontrollzentrum an die Bodenstationen.*

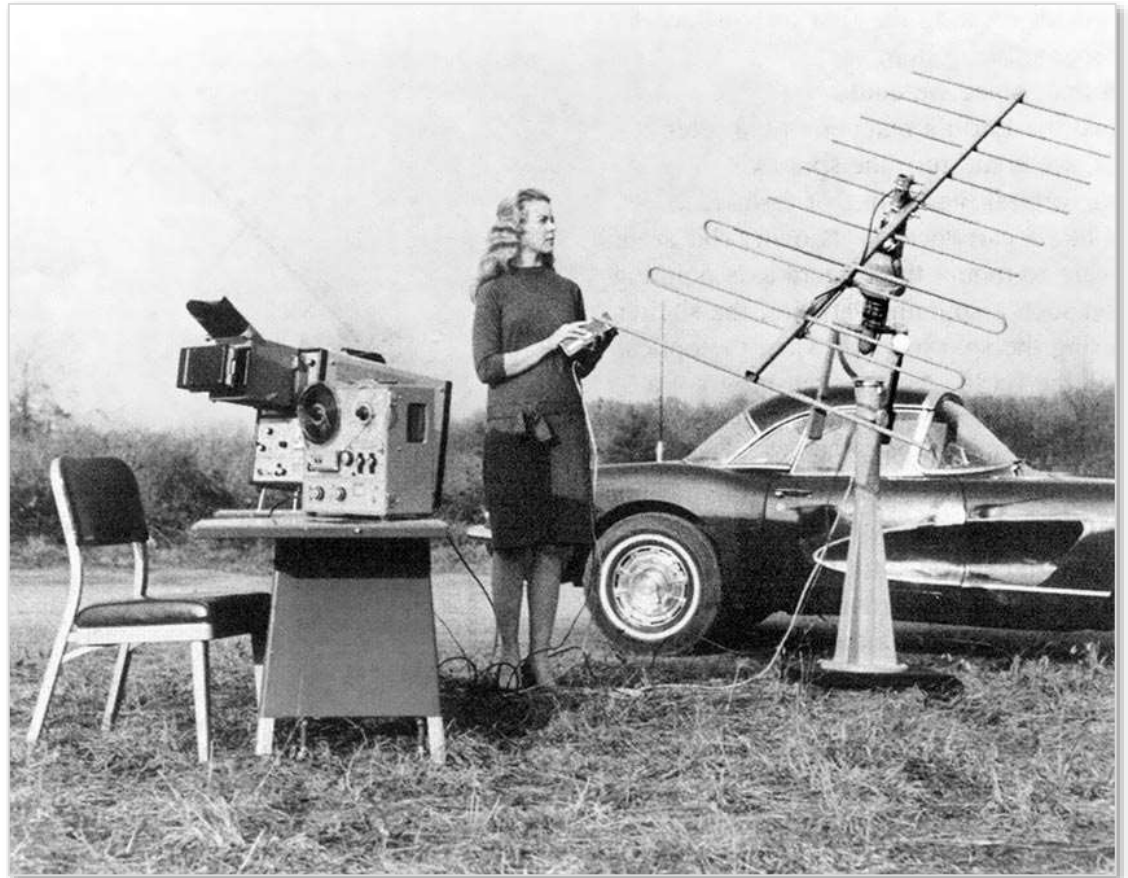


## Weather Spy – an Eye in the Sky (2)

*Today we are accustomed to having the best available predictions of severe weather systems, such as hurricanes or blizzards. Before weather satellites existed, the extent and origin of hurricanes was unknown or only suspected. They appeared in the eastern region of the United States and seemed to come from somewhere in the Caribbean. Many meteorologists were convinced that hurricanes really came from Africa and then traveled across the Atlantic. No one knew where they originated in the Pacific either; typhoons simply appeared, usually without any advance warning [...] This changed very rapidly after Tiros 1, which discovered at least one hurricane in the Atlantic before it was known by any other means. [...] Tiros 1 was the true beginning of weather satellites.*

Die Sendeleistung des Satelliten betrug 2W; gesendet wurde frequenzmoduliert auf 136.95 MHz; das Senden eines 500-zeiligen TV-Bildes dauerte etwa 200 Sekunden. Missionsdauer: 78 Tage.

*Empfangsstation für Satellitenbilder (1963): Yagi-Antenne, Oszilloskop zur Bilddarstellung und aufmontierte Polaroid-Kamera. Nicht dazu gehören: Vorführdame und Sportwagen.*



# Kommandoprogramme für Satellitenoperateure

Das Kontrollzentrum bestimmt, wann Bilder gemacht werden sollen und sendet die “**command programs**” den Operateuren der betroffenen Bodenstationen per Fernschreiben. Diese führen die Befehle aus “by using a push button arrangement in the command racks” der Bodenstation.

SPA 046  
TER D004  
PP NICOLA PMRWEA INFO WALACO  
WALWEA RCAHNJ WEABUR  
TIROSI  
DE SPACON 010  
P 121202Z  
BT  
TIROS VI  
13 MAY 1963  
ORBIT 3458 NICOLA  
AUTOSTART  
ADDRESS OFF  
DCS I 2 PI OFF ET 1.0M  
PB 2-1 SET ONE TO 8175  
SET TWO TO 7665  
DCS II 2 PI OFF ET 1.0M  
A1 101200Z  
A2 101300Z  
A3 101730Z  
PB PIX STARTED CAM 1 090630Z (ORBIT 3457 MIN AAN 39)  
PB PIX STARTED CAM 2 092330Z (ORBIT 3457 MIN AAN 56)  
NEXT RMT PIX TO START CAM 1 104530Z (ORBIT 3458 MIN AAN 39)  
NEXT RMT PIX TO START CAM 2 110230Z (ORBIT 3458 MIN AAN 56)

The top section of the teletype carries address codes. The information shown below these is related to **Tiros VI** and pertains to **Orbit No. 3458 on the 13 May**. The satellite shall be commanded by the **San Nicolas Island station** using the automatic command mode, i.e., the operator sets the commands and the various start times. The timer then takes over to sequence the series. For better understanding of the following, most of the command buttons are labeled in the ground stations with the same letter code as the ones teletyped. For instance, **DCS I 2 PI off ET 1.0M** means that the **direct camera sequence** of camera 1 shall be "on" for an elapsed time of 1.0 min. Picture interval, which can be set for a 10-sec or 30-sec interval sequence shall be "off", so that only a single direct picture will be received. Similarly, **playback** of system 2 and then 1 shall be commanded for, and the two clocks activating cameras in the remote mode shall be fed 8175 and 7665 timing pulses, respectively. Direct camera sequence of the second camera shall again last for 1 min. A1-3 are timer settings in absolute time (Greenwich meridian time), e.g., 10 hr 12 min 00 sec. The remaining information pertains to the previous orbit giving the station meteorologist information about the pictures he is about to receive.

Quelle: Rudolf Stampfl:  
“Communication from  
Weather Satellites”

# Auswertung der Satellitenbilder

Die [Interpretation der Satellitenaufnahmen](#), die zunächst lediglich die Wolkenformationen wiedergaben, sowie die Übertragung in meteorologische Karten mit Informationen zu Geographie und Luftdruck, war zunächst weiterhin eine kunstreiche Aufgabe erfahrener Meteorologen.



[Stampfl: The APT on the Polar Orbiting Weather Satellites]



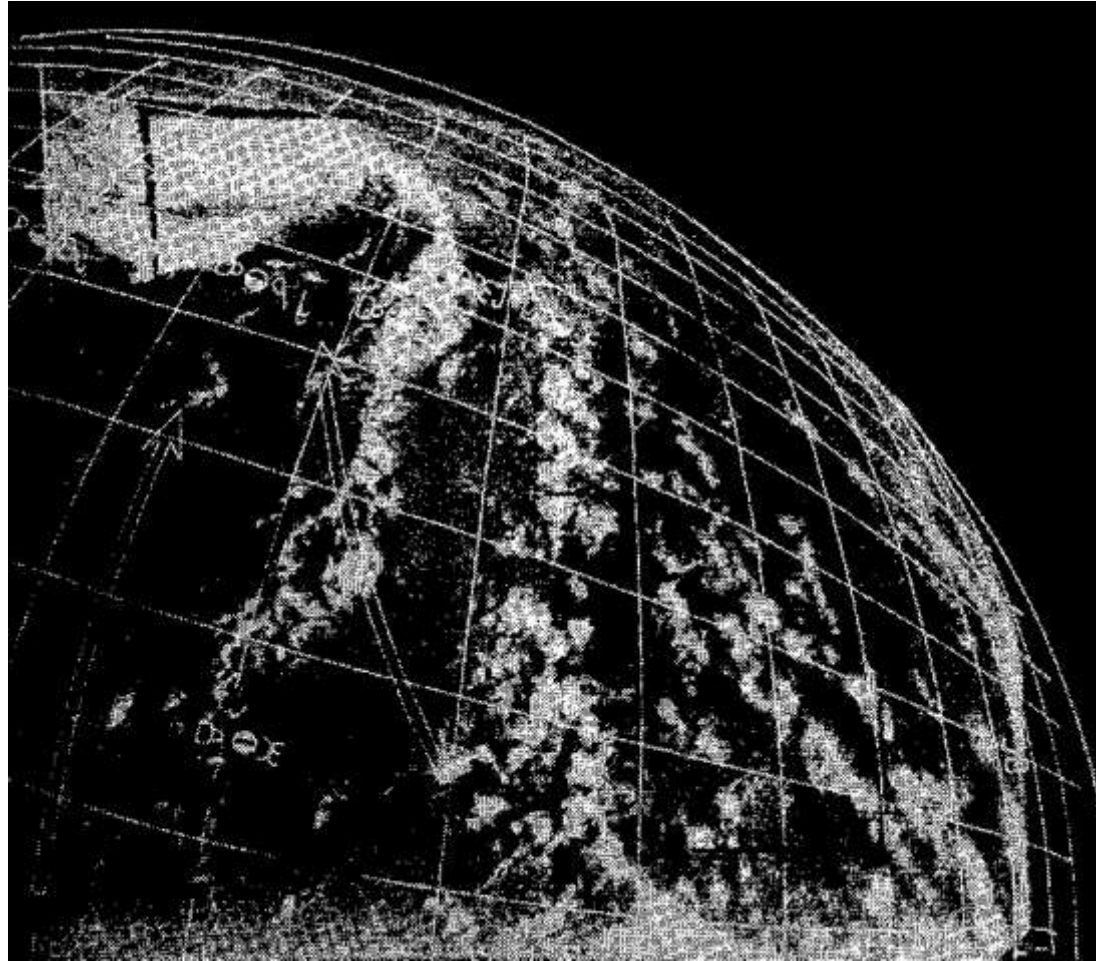
# Satellitenwetter beim Deutschen Wetterdienst



Regelmässig wurden erst Mitte der 1960er-Jahre **Satellitenbilder** in Richtung Erde gefunkt. Alles basierte auf **analoger Technik**. Die Papierbilder wurden von speziellen Automaten entwickelt; Breiten- und Längengrade sowie die Umrisse der abgebildeten Kontinente wurden per Hand mittels Schablonen und schwarzer Tusche aufgetragen. 1966 wurden beim Deutschen Wetterdienst täglich etwa ein Megabyte an Wetterdaten verarbeitet, 50 Jahr später, 2016, sind es bereits mehrere Terabyte pro Tag.

# Computer für die Realzeitdatenauswertung

Die Auswertung der Satellitenaufnahmen musste zügig geschehen, dazu sollte den Bildern in nahezu Realzeit ein **Gradnetz** überlagert werden. Dafür musste (z.B. aus einer Sequenz von Bildern, die jeweils einen kegel-förmigen Blick repräsentierten) zu-nächst die Lage und Blickrichtung des Satelliten bestimmt werden; beim TIROS-System übernahm ein **Bendix-G-15-Computer** in der Bodenstation diese Aufgaben. Ein **IBM 7090-Rechner** im Kontrollzentrum konnte mit den ermittelten Angaben („latitude and longitude of the sub-satellite point, altitude of the satellite as well as azimuth and nadir and spin angles which describe the attitude and radial position of the camera with respect to the earth“) ein perspektivisch korrektes Gradnetz zu erzeugen, dieses auf einem Plotter ausgeben oder direkt auf Film belichten und den Satelliten-aufnahmen überlagern.

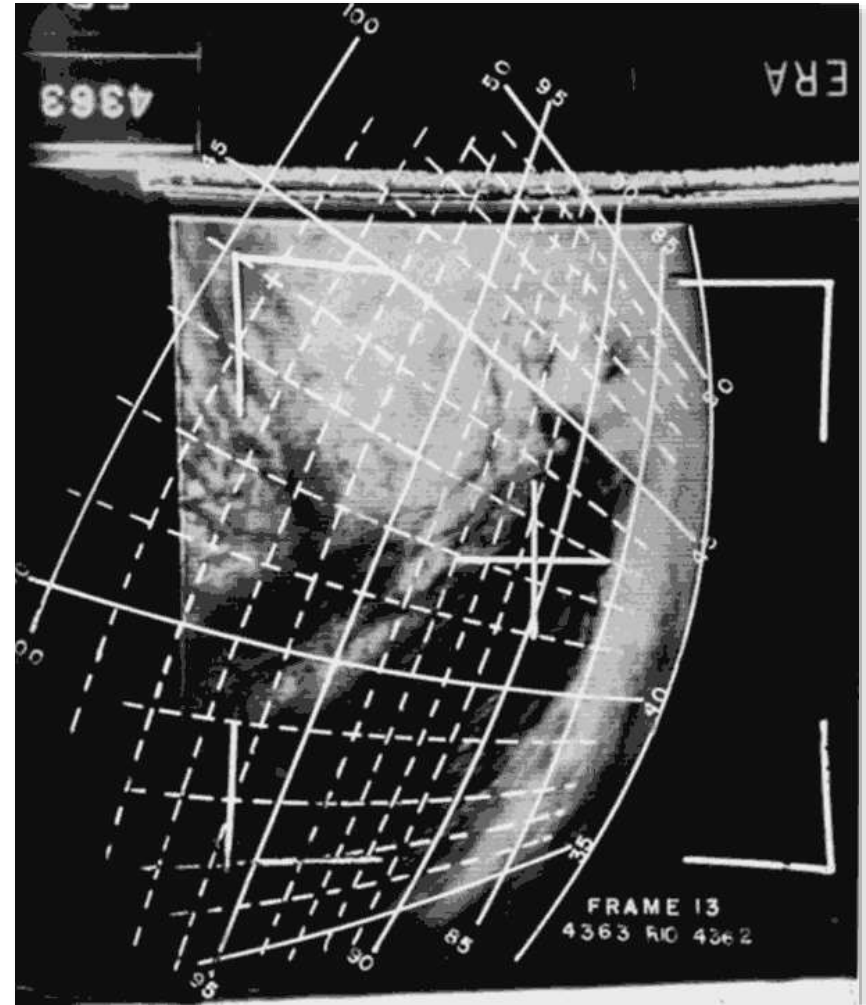


*Ein dem Wolkenbild (Trios-3, 20. Juli 1961) überlagertes perspektivisch berechnetes Gradnetz mit Horizontlinie.*

# Computer für die Realzeitdatenauswertung (2)

Weitere Aufgaben zur Daten- und Bildaufbereitung in Realzeit kamen bald hinzu: Aussortieren von Bildern, die nicht die Erde im Blick hatten, Kalibrierung der auf andere Weise gemessenen Infrarot-Strahlung und deren geographische Zuordnung, Korrektur von Bildverzerrungen durch das Linsensystem, Hinzufügen relevanter Meta-Informationen sowie von Küstenlinien aus einer Datenbank etc. Die gesamten Daten eines Orbits konnten so **innerhalb von 20 Minuten verarbeitet** und auf Magnetband gespeichert werden.

Für das Nachfolgesystem „**Nimbus**“, das pro Orbit bis zu 100 Fotos höherer Auflösung erzeugte, wurden bereits Anfang der 1960er-Jahre leistungsfähigere Computersysteme für **die Realzeitverarbeitung der Satellitendaten** konzipiert (IBM 7094 Mainframe mit zwei seinerzeitigen „Standardcomputern“ vom Typ IBM 1401 und CDC 160A, als zugeordnete Ein-/ Ausgabe-Subsysteme).



*Tiros-5-Foto vom 19. April 1963 mit überlagertem Netz von Breiten- und Längengraden. Quelle: National Environmental Satellite Center, Maryland.*



# Computer für die Satellitendatenauswertung

**Bendix G-15**, produziert von 1956 bis 1963. 1.5 m x 1 m x 1 m, 440 kg. 450 Elektronenröhren, 300 Germaniumdioden u. Trommelspeicher mit 2160 Wörtern zu je 29 Bit. Addition in 0.27 ms, Multiplikation in ca. 2.5 ms.



Die **IBM 7094** gehörte zu den leistungsfähigsten Mainframe-Computern der frühen 1960er-Jahre. Die Maschine wurde von der NASA und der amerikanischen Luftwaffe für „kritische“ Anwendungen genutzt und spielte z.B. im Gemini- und Apollo-Raumfahrtprogramm eine wichtige Rolle. Sie wurde auch im amerikanischen Schutzsystem zur Abwehr nuklearbestückter Interkontinentalraketen eingesetzt.

Roadshow der **IBM 1401**, hier vor dem Atomium in Brüssel. Sie war das Arbeitspferd der elektronischen Datenverarbeitung der 1960er-Jahre und wurde insgesamt über 12000 Mal verkauft.



# Satelliten zur Datenkommunikation

Bereits 1962 demonstrierten die beiden IBM-Ingenieure Chester Siminitz und C. Fred Woidt eine ganz neue Anwendungsmöglichkeit für Satelliten: Sie nutzen ein an einen IBM 1401-Computer (im Bildhintergrund) angeschlossenes **Modem**, um **Daten via Satellit** zwischen USA und Frankreich (**Telstar**) auszutauschen. Das Modem war eine „IBM 1009 Data Transmission Unit“ mit den Ausmassen einer Waschmaschine zum Preis von 7000 englischen Pfund, hier im Vordergrund des Bildes. Das Kommunikationsprotokoll („Synchronous Transmit-Receive“, STR) ermöglichte Datenraten von 150 Zeichen pro Sekunde und konnte fehlerhaft übertragene Datenblöcke (zu jeweils 1200 Bit) automatisch wiederholen.



Das erste Bild  
von Meteosat-1  
am 9. 12. 1977

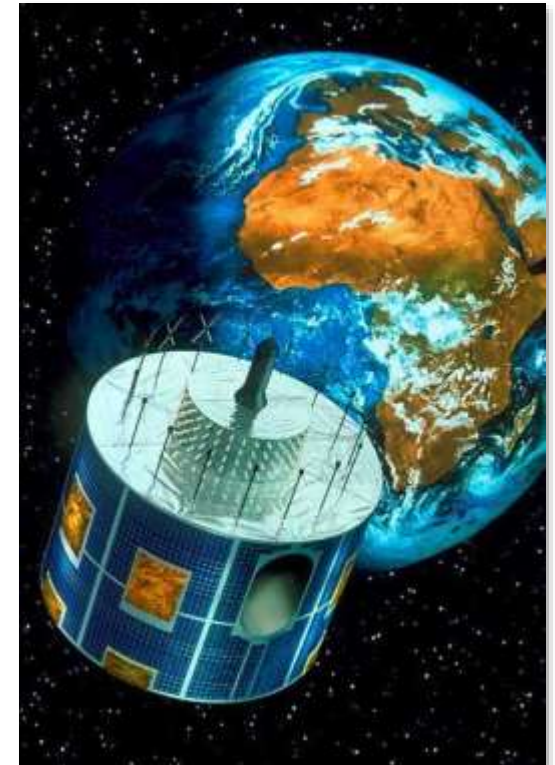




# Meteosat

Bald nach dem zweitem Weltkrieg begann der Wettlauf zwischen den USA und der Sowjetunion zur **Eroberung des Weltalls** mit künstliche Erdsatelliten zur Telekommunikation und Spionage (Sputnik 1 als Startschuss der sowjetischen Raumfahrt 1957), Raketen interkontinentaler Reichweite, erdumlaufenden Raumkapseln (besetzt zunächst mit Hunden und bald darauf Kosmonauten und Astronauten) und schliesslich dem Ziel der Mondlandung. 1959 starteten die USA erste militärischen Erdbeobachtungssatelliten („Keyhole“), 1960 mit TIROS-1 einen ersten **experimentellen Wettersatelliten**, der Fernsehbilder mit einer Auflösung von etwa 3 km zur Erde funkte, auf denen grossflächige Wolkenformationen erkennbar waren. Erste **geostationäre Wettersatelliten** wurden Mitte der 1960er-Jahre gestartet, aber erst in den 1970er-Jahren wurden Satelliten als meteorologische Datenquellen systematisch genutzt. Dazu gehören die GOES-Satelliten der US-amerikanischen Wetterbehörde NOAA sowie die Meteosat-Satelliten der European Space Agency (ESA).

Die **Meteosat**-Satelliten haben eine Lebenszeit von einigen wenigen Jahren und befinden sich in einem geostationären Orbit ca. 36000 km über dem Äquator. Mindestens drei solche Satelliten sollten jederzeit aktiv sein, davon nimmt einer die Position bei 0° geographischer Länge (ideal für Europa und Afrika) ein, weitere zwei bis drei Satelliten stehen etwas weiter östlich. **Meteosat-1** wurde 1977 gestartet; 2018 waren aktiv Meteosat-8 (bis 2020), Meteosat-9, -10 und -11 (alle voraussichtlich bis 2024).



# Meteosat (2)

Ab 2021 sollen sukzessive sechs Satelliten einer neuen Generation zum Einsatz kommen, die eine längere Lebensdauer (15 bis 20 Jahre) haben und erweiterte Beobachtungsmöglichkeiten bieten. Seit 2006 wird neben dem geostationäre Meteosat-System auch das EPS-System („Eumetsat Polar Systems“) mit Satelliten in [polar-erdnahe Umlaufbahn](#) betrieben.

Schon vor der Initiierung des Meteosat-Programms entwickelte Europa in strategischer Hinsicht Ambitionen bei der Raumfahrttechnik. Zunächst ging dies von einzelnen Staaten wie Frankreich und Grossbritannien aus, Anfang der 1960er-Jahre schlossen sich mehrere europäische Staaten zusammen, um gemeinsam Forschungssatelliten und Trägerraketen zu entwickeln. Letzteres gelang erst nach einigen Fehlschlägen mit dem Ariane-Programm. Als Institution entstand dafür schliesslich die [ESA \(European Space Agency\)](#) mit diversen Unterorganisationen (wie ESDAC oder ESOC).

*Meteosat-8 wird im August 2002 auf eine Trägerrakete Ariane 5 montiert*



Bildquelle: Esa Bulletin 2017/2

# Europäische Satelliten

Das „[European Space Data Analysis Center](#)“ ([ESDAC](#)) in Darmstadt nahm 1963 seine Arbeit auf. Im Auftrag der European Space Research Organisation (einer Vorgängerorganisationen der [European Space Agency ESA](#), gegründet 1962 von zehn europäischen Staaten, darunter der Schweiz und Deutschland) wurden hier Satellitendaten analysiert. Dass diese Institution nach Darmstadt kam, lag daran, dass die Stadt damals das „[Deutsche Rechenzentrum](#)“ ([DRZ](#)) mit einem der wenigen „Grossrechner“ Deutschlands beherbergte. (Heute befindet sich in diesem Gebäude das Fraunhofer-Institut für Sichere Informationstechnologie). Das DRZ wurde 1961 als überregionales Grossrechenzentrum auf Betreiben von [Alwin Walther](#), Leiter des Instituts für Praktische Mathematik an der TH Darmstadt, gegründet. Alternativ war als Sitz für ESDAC zunächst noch Commugny (Kanton Waadt) nahe der Sternwarte Genf in der Diskussion, die Mehrheit der beteiligten Staaten stimmte aber dann für Darmstadt.

Im November 1966 erhielt das ESDAC schliesslich einen [eigenen Computer](#) – mit unfassbaren „dreihunderttausend Grundrechnungen pro Sekunde“ schwärmte seinerzeit das „Darmstädter Tagblatt“. („Tastaturen gab es nicht, die Befehle wurden per Lochkarte eingegeben. Auch Computerdisplays waren noch unbekannt, es gab nur Zeilendrucker und die spuckten Oktalzahlen aus, die wir erst im Kopf umrechnen mussten“, erinnert sich der ehemalige Mitarbeiter Kurt Debatin.) Schon 1967 erhielt das Zentrum einen neuen Namen („[European Space Operations Centre](#)“, [ESOC](#)) sowie die Missionskontrolle als Zusatzaufgabe. Als „Spin-off“ entstand 1989 [EUMETSAT](#) für den Wettersatelliten-Betrieb.

*ESOC: Siemens-Computer (1976)*

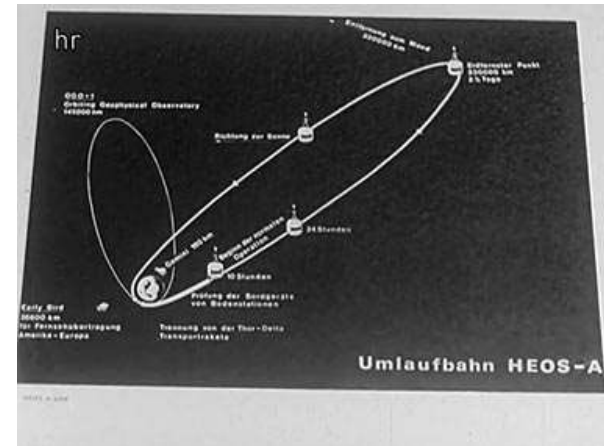
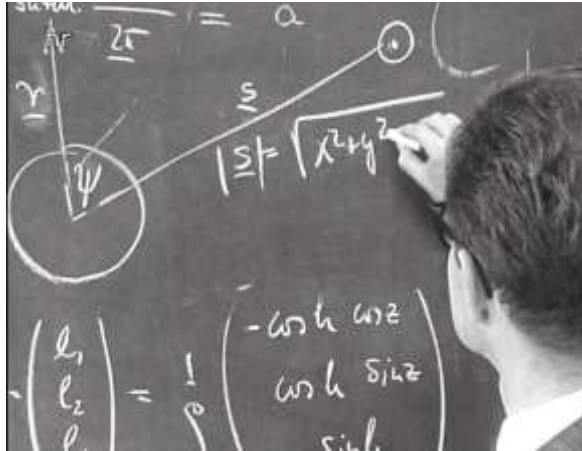


[www.esa.fr/spaceimages/Images/](http://www.esa.fr/spaceimages/Images/)



# Europäische Satelliten (2)

Der Hessische Rundfunk stellte im September 1967 das europäische Raumflugkontrollzentrum ESOC vor: Bahnberechnung von Satelliten mittels Tischrechenmaschine und IBM360/50-Computer.



[www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Videos/2017/09/ESOC\\_inauguration\\_1967](http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2017/09/ESOC_inauguration_1967)

# Europäische Satelliten (3)

***Madeleine Schäfer, eine langjährige Mitarbeiterin des europäischen Missionskontrollzentrums ESOC, verfasste 1997 ein zweibändiges Werk mit Geschichten über die Arbeit beim Zentrum („How to Survive in Space!“). Nachfolgend einige instruktive Passagen daraus.***

*In der Anfangszeit hatte das Zentrum keinen eigenen Computer, sondern nutzte einen IBM-Grossrechner beim „Deutschen Rechenzentrum“ (DRZ):*

Programs were written laboriously in long hand on special FORTRAN forms, which were handed to two “punch card” girls. They operated two card punches on the premises and produced punch cards of the whole program, which, if you were fortunate, were all correct, but more likely to contain irritating “punch errors”. After the originator of the programs had checked each card, the programs were assembled into boxes and taken twice a day to the DRZ to run.

*Die Lochkarten transportierte “Philip” bei jedem Wetter zu Fuss:*

...in the winter when the paths were icy. More than once did Philip make an inelegant landing, scattering punch cards hither and thither [...] On one occasion he dropped the entire Differential Correction Program consisting of somewhere near 1000 cards. The remarks on that occasion were more than caustic. [...]

The word “computer” was gradually infiltrating into the German language. Up until then the layman had simply referred to a computer as an “Elektronengehirn”. Now they were adopting



ESOC-Satellitenkontrollraum 1960er-Jahre

the English word, but giving it their own particular pronunciation. The foreman of the building firm, who came from the Pfalz, used to inform me of the progress of the ESDAC kompooter-room, while his Hessian colleagues agreed that we would soon be able to install our kombjuder.

*Ohne E-Mail und Internet war die Kommunikation des Kontrollzentrums mit den geographisch weit-räumig verteilten Bodenstationen, die mit ihren grossen Antennen die Verbindung zu den Satelliten hielten, schwierig; dies ging nur per Telefon oder Fernschreiber – Daten bzw. Meldungen des Fernschreibers konnten dabei auf fünfspurigen Lochstreifen aus Papier gespeichert werden:*

The Orbit Team would calculate the satellite's present and future orbits and produce "pass" predictions, i.e. information on when and where the satellite would be "visible" over the ground stations. This information would then be transmitted to the ground stations concerned, so that they would know in which direction to point their antennae. The Control Centre would also receive a computer printout listing all the passes for all the stations. On the basis of this list they would schedule the stations, indicating what was to be done during each pass, which commands to send, which data to receive, which parameters to extract, etc. During a pass, the ground stations would "track" the satellite and send this data back to ESOC. The Orbit Team would then use these tracking messages to compute a new orbit and produce new pass predictions.

[...] In those days all communications with the ground stations were only by teleprinter. I wonder how many people in these internet and email days know what a teleprinter was. It looked innocent enough – rather like an oversized typewriter, generally perched on stork-like legs. It was, however, diabolical. When it was about to receive a message it would, with no more warning than a sly flickering of its red and green lights, burst into life with a noise like the trumpets of Jericho, startling everybody who happened to be standing near it. Then, with a brisk "clackety-clac"



ESOC-Satellitenkontrollraum 1981



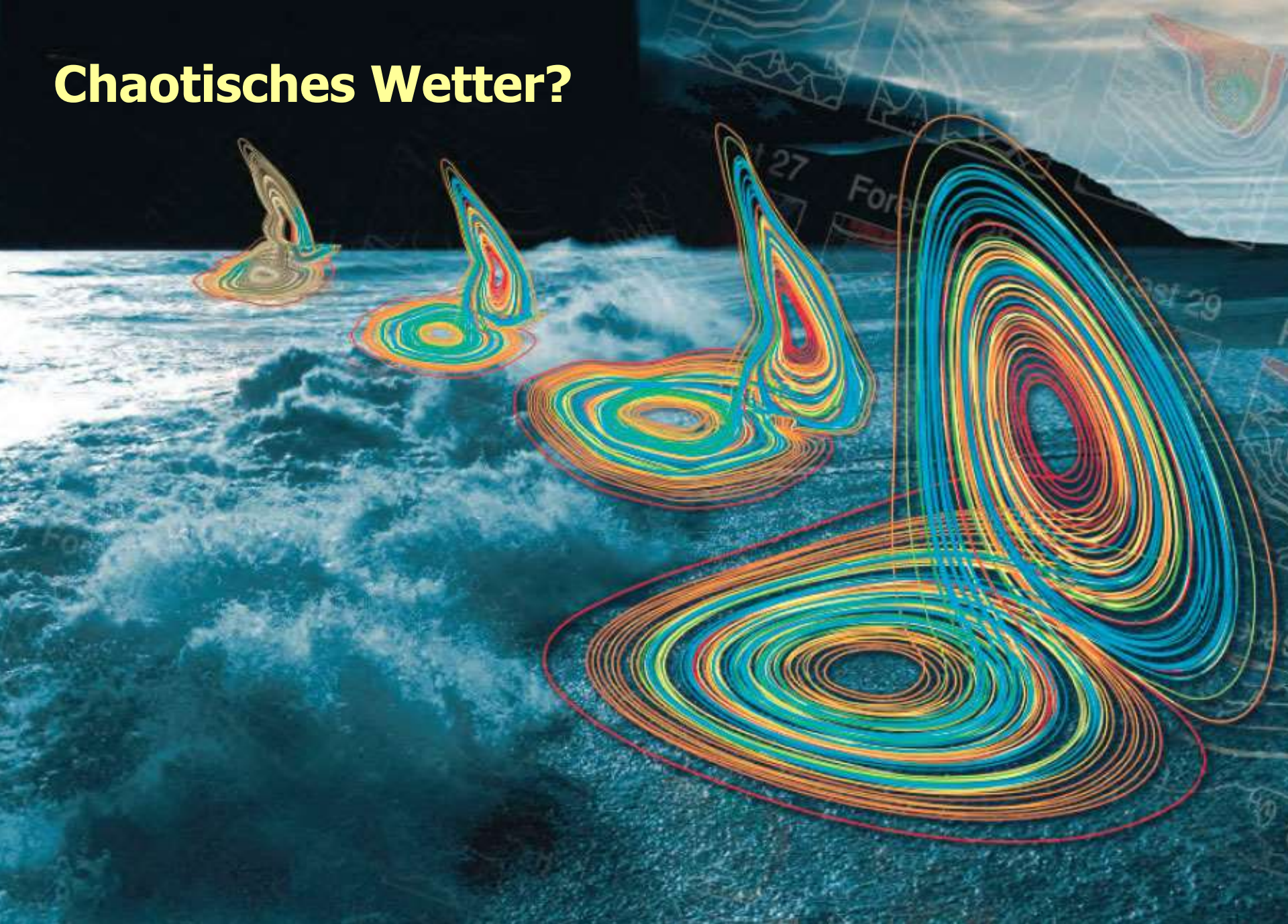
it would churn out its message and, provided the operator had remembered to switch on the device, spew forth reams of paper tape containing the same message, but coded in 5-track format. Oh, that paper tape! Even if you were hardy enough to survive the teleprinter's assault on your nerves, you could be fairly certain that the paper tape would reduce you to a wreck sooner or later.

We used to compute the orbit and produce the predictions for a satellite on a weekly basis. Now, as I said, the tracking data would arrive at ESOC in the form of a teleprinter message accompanied by a length of paper tape. There would be several a day, so by the end of a week we would have a large bin full to the brim with flimsy pieces of paper and paper tapes twirled into figures-of-eight by the competent operators.

You cannot compute an orbit on a binful of paper tapes. They have to be converted to some computer-compatible form, for example a magnetic tape or a disk. We acquired a paper tape input device which read the paper tape and put its contents onto a disk. At least that was what it was supposed to do. It was almost as human and just as diabolical as the teleprinter. It would read one tape, reject the next for no visible reason, and when forced to read a third chew it up in protest. We would pander to its whims, talk to it lovingly, reset all its buttons and start all over again. Ah, but wait a minute. Which tape had been accepted and which rejected?

In those days, we always telexed the commands to the stations one day in advance. One of the stations tracking the satellites was Spitzbergen. Now, after we had sent the telex, we discovered there had been an on-board anomaly which made it absolutely essential to stop them being sent from Spitzbergen. We tried to contact Spitzbergen by telephone to inform them. We couldn't get through. We tried by telex. That didn't work either. There were magnetic disturbances which affected the link between Tromsø and Spitzbergen – there was simply no way we could get in touch with them. We tried for hours, and were almost in despair. The Tromsø station came to our help. "In Sweden", they said, "there is a radio station which broadcasts a regular music programme. We know that the staff at Spitzbergen always listen to that programme!" Tromsø provided us with the telephone number of the radio station, and we phoned them and asked them to include the following message in their programme: "The ESRO Satellite Control Centre in Darmstadt requests the station at Spitzbergen not to transmit commands to ESRO-1A!" One orbit later, the satellite had a pass over Redu, we were able to check from there if anything had happened – and breathed a sigh of relief. There was no change in the satellite status, the commands had not been sent – Spitzbergen had received our message!

# Chaotisches Wetter?





# Laplacescher Dämon

Im 19. Jahrhundert glaubte man an einen strengen Determinismus in der Natur: Eine Reihe physikalischer Prinzipien (wie z.B. Erhaltung von Masse und Energie oder die Hauptsätze der Thermodynamik, die u.a. für die Meteorologie relevant sind) war mittlerweile bekannt und viele Naturgesetze konnten mathematisch formuliert werden. Auf besonders nachdrückliche Weise verlieh der französische Mathematiker und Astronom Pierre-Simon Laplace (1749 – 1827) dem deterministischen Naturverständnis dadurch Ausdruck, dass er gedanklich eine Art Weltgeist (später „Laplacescher Dämon“ genannt) postulierte, der jeden zukünftigen Zustand der Welt (und damit natürlich auch das Wetter!) absolut genau vorherberechnen kann – *„une intelligence qui, pour un instant donné, connaît toutes les forces dont la nature est animée, et la situation respective des êtres qui la composent, [...] embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir comme le passé, serait présent à ses yeux.“*

Für einen freien Willen oder schicksalshafte Götter, die den Lauf der Welt nach Lust und Laune bestimmen, hat es in diesem Weltbild keinen Platz. Dazu passt eine Begebenheit, die der Astronom Hervé Faye beschreibt: Als Laplace sein Buch *Exposition du système du monde* Napoléon Bonaparte zeigte, sagte dieser zu ihm: „Newton a parlé de Dieu dans son livre.



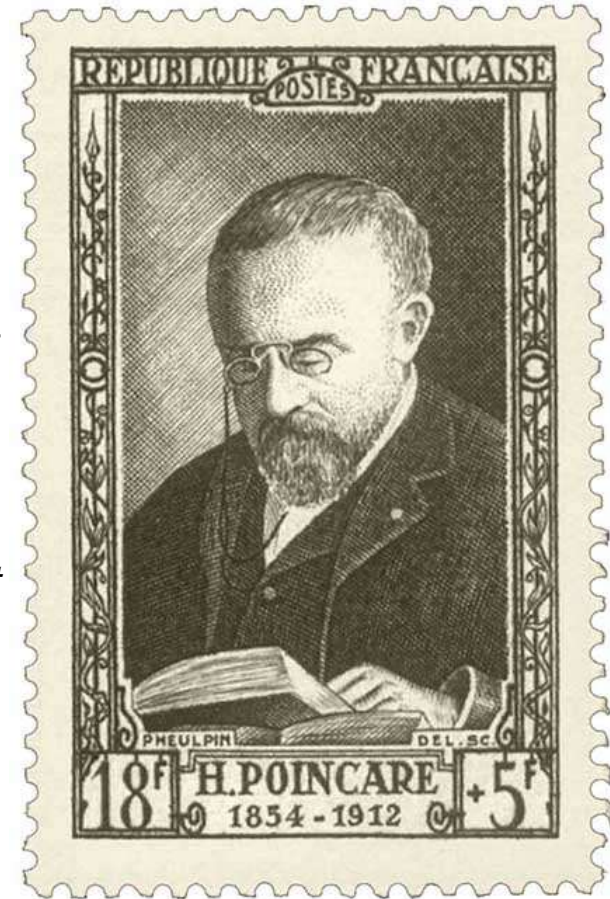


# Von Laplace zu Poincaré

J'ai déjà parcouru le vôtre et je n'y ai pas trouvé ce nom une seule fois.“ Laplace erwiderte ihm: „Citoyen premier Consul, je n'ai pas eu besoin de cette hypothèse.“

Die Frage, ob und in welchem Sinne es, auch bei Einbezug der Quantentheorie, einen allumfassenden Determinismus geben kann, ist bis heute ein philosophisches Problem geblieben, aber seit Heisenberg ist man in dieser Hinsicht doch stark ernüchtert – der Vorhersagbarkeit von Vorgängen in der Natur scheinen jedenfalls prinzipiell unüberschreitbare Grenzen gesetzt zu sein. In praktischer Hinsicht hat dies sogar schon Henri Poincaré (1854 – 1912) in seinen Analysen zur Stabilität des Sonnensystems erkannt; er schrieb 1908 in seinem Buch *Science et méthode*:

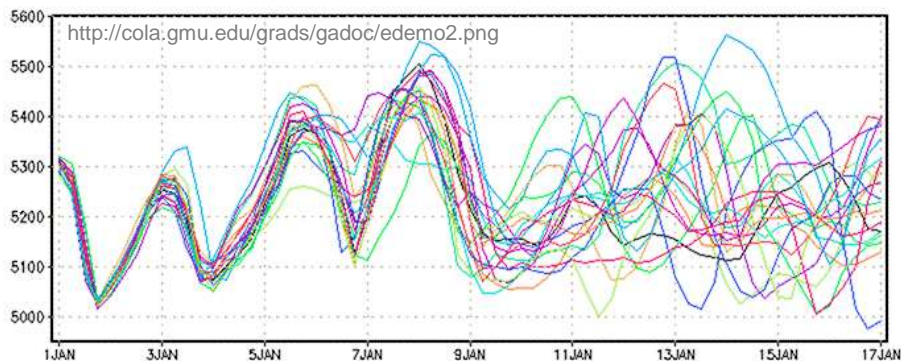
„Si nous connaissions exactement les lois de la nature et la situation de l'univers à l'instant initial, nous pourrions prédire exactement la situation de ce même univers à un instant ultérieur. Mais, lors même que les lois naturelles n'auraient plus de secret pour nous, nous ne pourrions connaître la situation initiale qu'*approximativement*. Si cela nous permet de prévoir la situation ultérieure avec *la même approximation*, c'est tout ce qu'il nous faut, nous disons que le phénomène a été prévu, qu'il est régi par des lois ; mais il n'en est pas toujours ainsi, il peut arriver



# La prédiction devient impossible

que de petites différences dans les conditions initiales en engendrent de très grandes dans les phénomènes finaux; une petite erreur sur les premières produirait une erreur énorme sur les derniers. La prédiction devient impossible et nous avons le phénomène fortuit.“

Die Erkenntnisse Poincarés gerieten jedoch zunächst in Vergessenheit, bis in den 1960er-Jahren der amerikanische Mathematiker und Meteorologe Edward Lorenz (1917 – 2008), einer der Wegbereiter der Chaostheorie, deren Bedeutung für die numerische Wettervorhersage neu entdeckte.



Das Gebiet der probabilistischen oder Ensemblevorhersagen. Deren Prinzip ist es, durch geeignete Variationen in den Anfangsbedingungen und Modellformulierungen abzuschätzen, wie gross

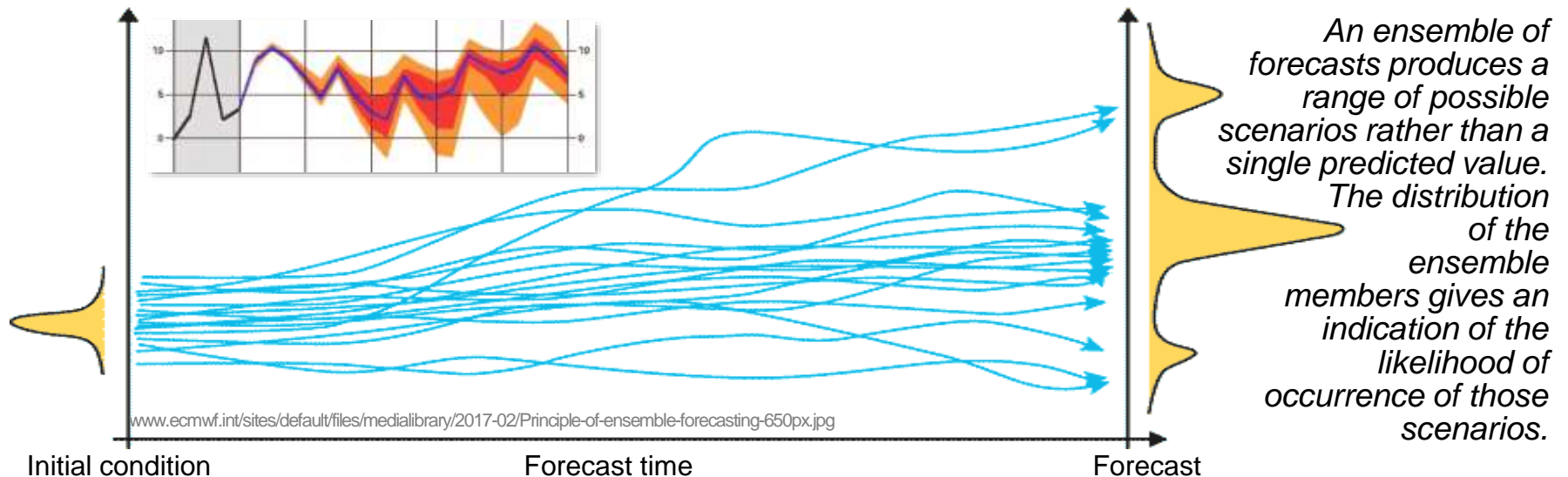
Wassily Kandinsky, 1923



Dass jede Vorhersage in der Meteorologie eine gewisse Unsicherheit aufweist, ist evident; die Chaostheorien verschärfen das Problem dahingehend, dass beliebig kleine Unterschiede in den Anfangsbedingungen deterministischer Systeme im Laufe der Zeit zu starken Unterschieden bei den Ergebnissen führen. Als Konsequenz dieser Erkenntnisse entwickelte sich das Forschungsgebiet der probabilistischen oder Ensemblevorhersagen. Deren Prinzip ist es, durch geeignete Variationen in den Anfangsbedingungen und Modellformulierungen abzuschätzen, wie gross

# Ensemblevorhersagen

die jeweilige Unsicherheit der Vorhersagen ist. Anstatt nur eine einzige Modellrechnung durchzuführen, wird nun ein ganzes Bündel von Modellrechnungen gestartet. Auf diese Weise gelingt es, verschiedene mögliche Wetterentwicklungen zu erfassen und aus der Verteilung der unterschiedlichen Lösungen die Unsicherheit der Vorhersage im Einzelfall abzuschätzen.

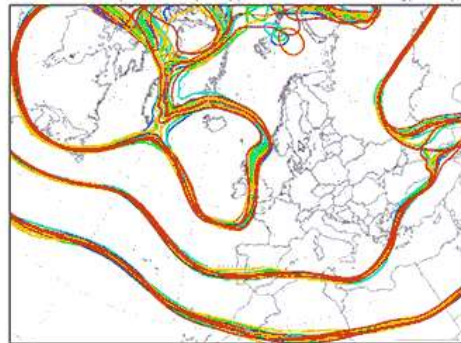


Da bereits die Berechnung einer einzigen numerischen Wettervorhersage sehr leistungsfähige Rechner erfordert, werden zur Erzeugung von Ensemblevorhersagen die schnellsten Supercomputer der Welt eingesetzt. Bezüglich der Rechenzeit besteht dabei ein Zielkonflikt zwischen der Grösse des Ensembles und der Komplexität des Vorhersagemodells, insbesondere seiner Gitterweite. Beim Vorhersagesystem COSMO-DE für Deutschland werden derzeit parallel 40 Modellvorhersagen gerechnet, die sich leicht in den Anfangs- und Randbedingungen und Modelleigenschaften unterscheiden.

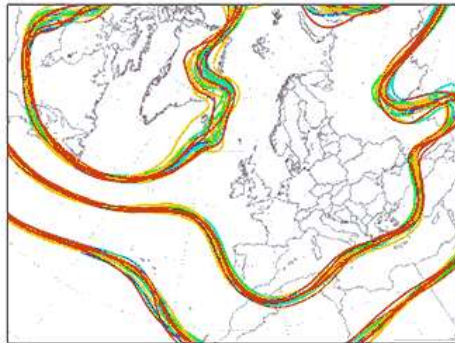


# Ensemblevorhersagen (2)

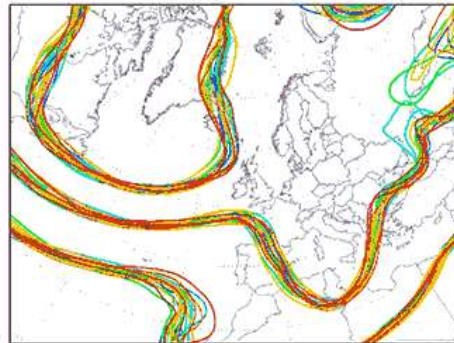
[www.wetterzentrale.de/en/topkarten.php?map=1&model=gfs&var=1&run=18&time=12&lid=SPAG&h=0&mv=1&tr=6#mapref](http://www.wetterzentrale.de/en/topkarten.php?map=1&model=gfs&var=1&run=18&time=12&lid=SPAG&h=0&mv=1&tr=6#mapref)



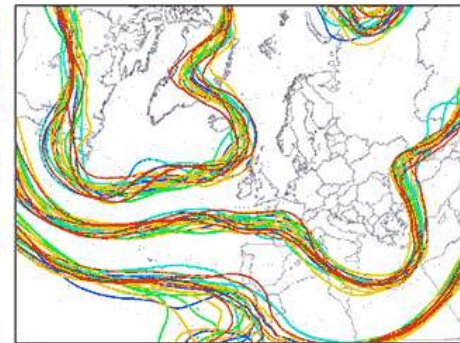
24-Stunden-Prognose



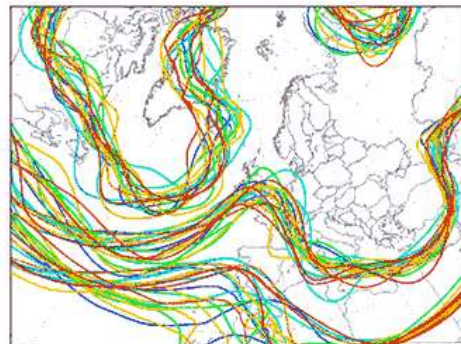
2 Tage



3 Tage



4 Tage



5 Tage



6 Tage



7 Tage



8 Tage

*Ensemblevorhersagen mit dem GFS-Modell des amerikanischen Wetterdienstes NCEP: Linien gleichen Geopotentials (d.h. der potentiellen Energie der Luft) von 20 Prognosen mit leicht unterschiedlicher Anfangsbedingungen vom 24. Jan. 2009 – nach einigen Tagen manifestiert sich unweigerlich das Chaos!*

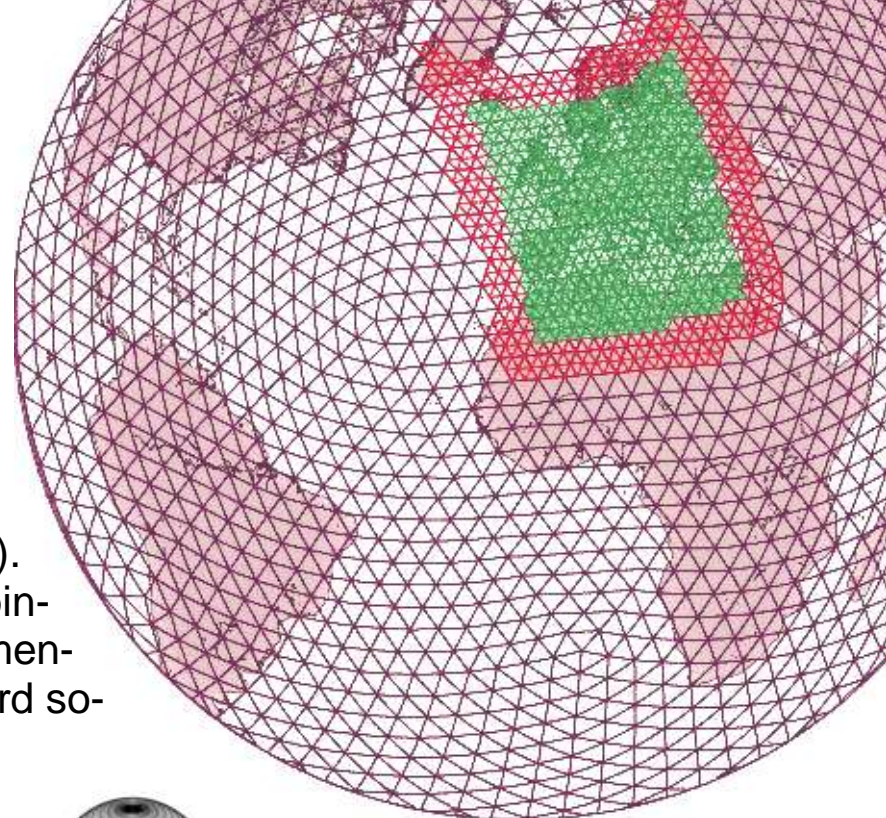
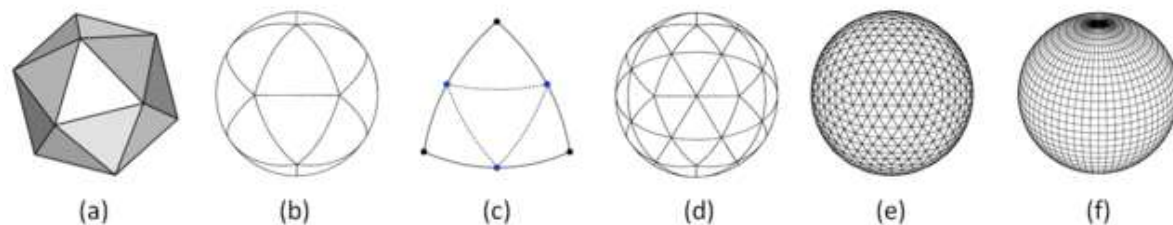






# Wettermodelle heute

**Globale Wettermodelle** überziehen den Globus mit einem **Gitter**. Beim globalen Modell ICON des DWD besteht das Gitter in der Horizontalen aus lauter **Dreiecken**, die die Kugeloberfläche nahezu gleichförmig überdecken. Man gewinnt dieses Gitter, indem man ein Ikosaeder (a) in die Erdkugel einbettet und dessen 20 Dreiecke auf die Kugel projiziert (b). Die sphärischen Dreiecke werden dann durch Verbindung der Seitenmittelpunkte mittels Grosskreissegmenten viergeteilt (c). Der „sphärische Ikosaeder“ (d) wird soweit nötig weiter rekursiv verfeinert (e, f).

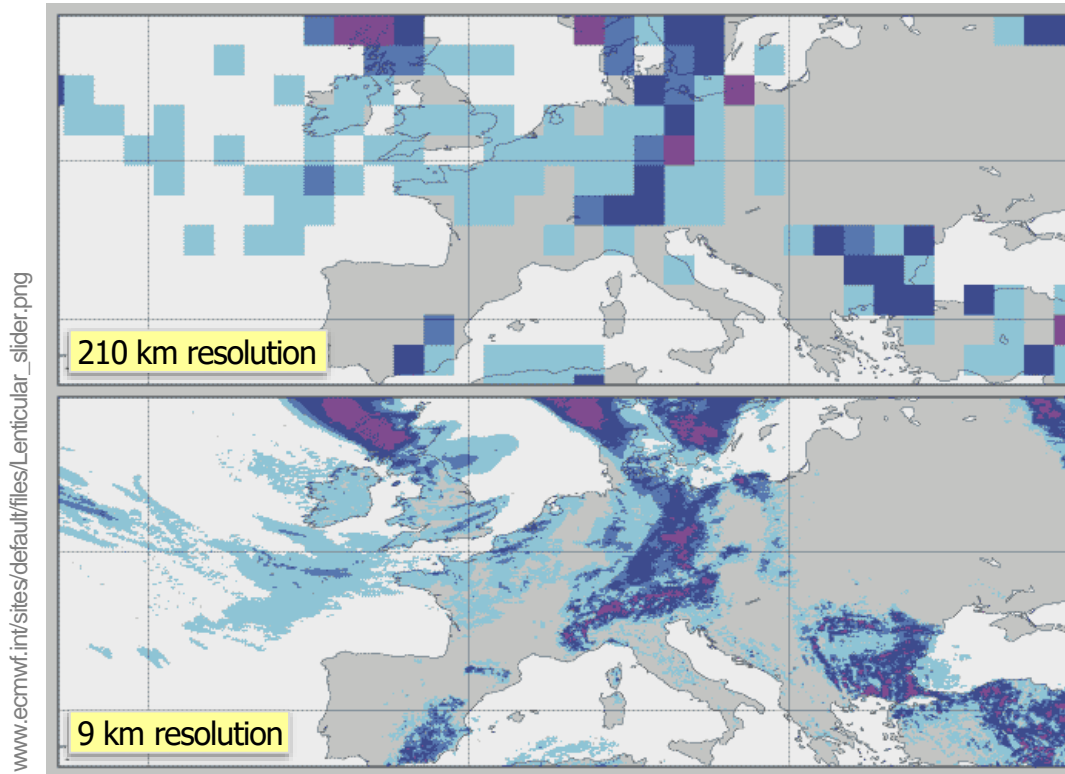


Der durchschnittliche Abstand der Gitterpunkte beträgt beim Modell des Jahres 2017 etwa **13 Kilometer**. In der dritten Di-

mension unterteilt es die Atmosphäre in **90 Schichten**, so dass das Modell insgesamt über mehr als 265 Millionen Gitterpunkte verfügt. In einem Gebiet über Europa ist das Gitternetz noch weiter verfeinert, so dass dort der durchschnittliche Abstand der den Dreiecken zugeordneten Gitterpunkte etwa **6.5 Kilometer** beträgt. Das zugehörige Differentialgleichungssystem besteht aus etwa  $10^8$  bis  $10^9$  Gleichungen und wird mit einem Zeitintegrationsverfahren gelöst. Die nationalen Wetterdienste setzen für ihr Gebiet zusätzlich auch noch höher auflösende Modelle ein (Maschenweite in Deutschland 2.8 km, in Grossbritannien 2.2 km, in der Schweiz 1.1 km).



# Wettermodelle heute (2)



Year	Horizontal resolution (global/local)	Number of vertical levels
1959	(N.A./320 km)	2 levels
1965	(N.A./300 km)	3 levels
1972	(300 km/100 km)	10 levels
1982	(150 km/75 km)	15 levels
1991	(90 km/17 km)	19 levels
1997	(60 km/12 km)	38 levels
2004	(40 km/12 km)	50 levels
2006	(40 km/4 km)	50 levels
2009	(17 km/1.5 km)	70 levels
2015	1.5 km	

Wettermodelle des britischen Met Office im Laufe der Zeit

Höhere Rechenleistung der Supercomputer ermöglichte eine fortwährende Verbesserung der Genauigkeit der Modelle. Das [Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage](#), eine 1975 gegründete zwischenstaatliche Organisation mit Sitz in Reading (UK), begann mit einer Horizontalauflösung von 210 km, 2017 waren es 9 km (im Jahr 2017 bestand der Cray-XC-Supercomputer aus 260 000 Prozessorkernen); für kleinere (z.B. nationale) Gebiete rechnet man mit noch höherer Auflösung.

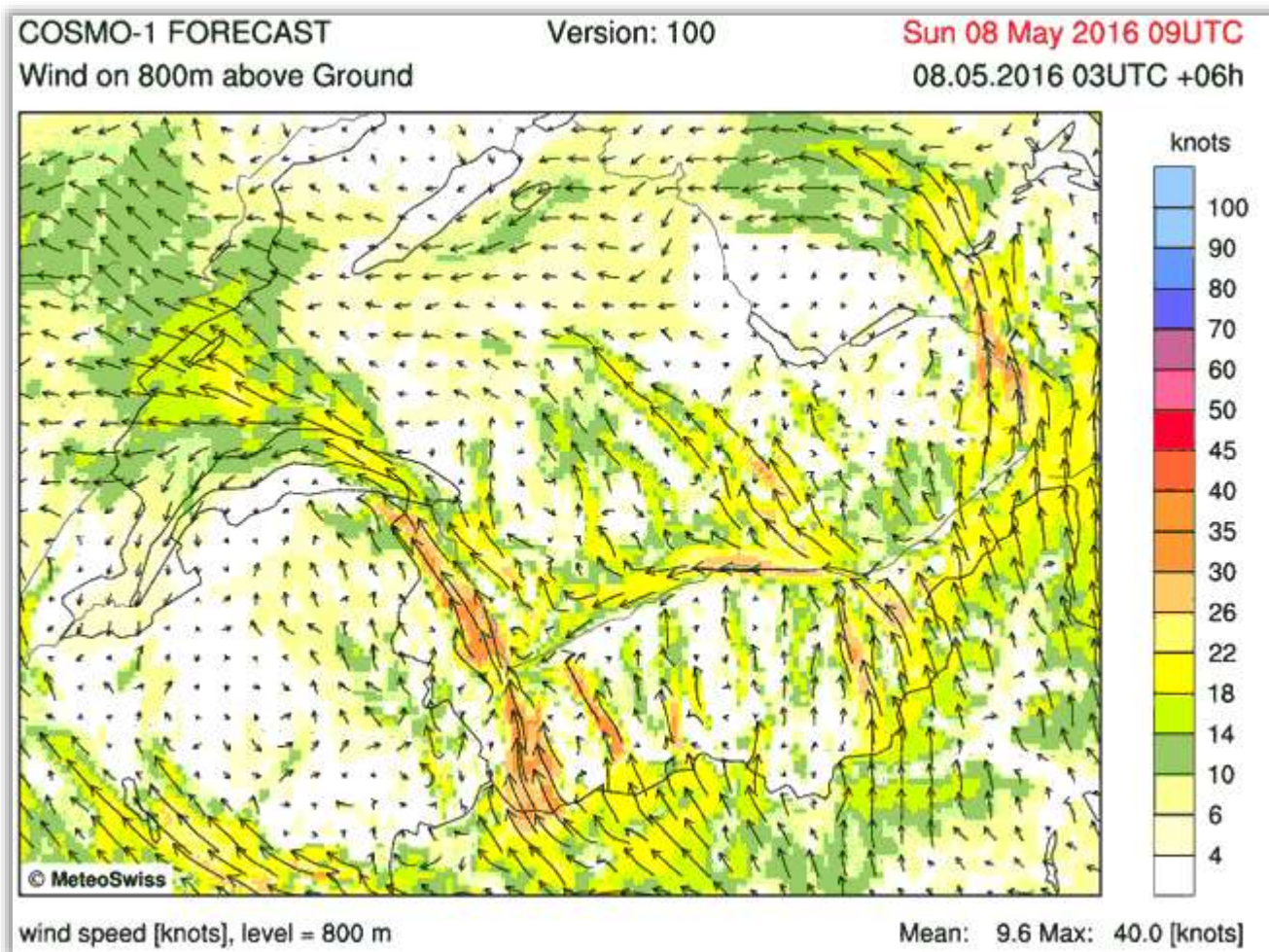
# Wettervorhersage Schweiz 2016+



Das Nationale Hochleistungsrechenzentrum der Schweiz (**CSCS**, Centro Svizzero di Calcolo Scientifico) ist eine 1991 in Manno (TI) gegründete Einheit der **ETH Zürich**, die sich seit 2012 in **Lugano** befindet. Für die Kühlung der Rechner wird Wasser des Luganer Sees aus 45 m Tiefe über eine Strecke von 2.8 km zum Rechenzentrum gepumpt. Unter anderem werden seit 2016 zwei identische CS-Storm-Systeme von Cray, "Piz Kesch" und "Piz Es-cha", für Meteo-Swiss-Wettervorhersagen mit dem COSMO-1-Modell betrieben. Das Gesamtsystem besteht aus 24 CPUs (Intel Haswell, 12 cores, 2.6 GHz) und 192 NVIDIA-GPUs mit 2 Mal 196 Tflops Gesamtleistung. Bilder: [www.cscs.ch/computers/kesch\\_escha\\_meteoswiss/index.html](http://www.cscs.ch/computers/kesch_escha_meteoswiss/index.html)

# Vorhersagemodell COSMO für die Schweiz

Beispiel: 6-Stunden-Prognose der Windgeschwindigkeit in 800m Höhe:

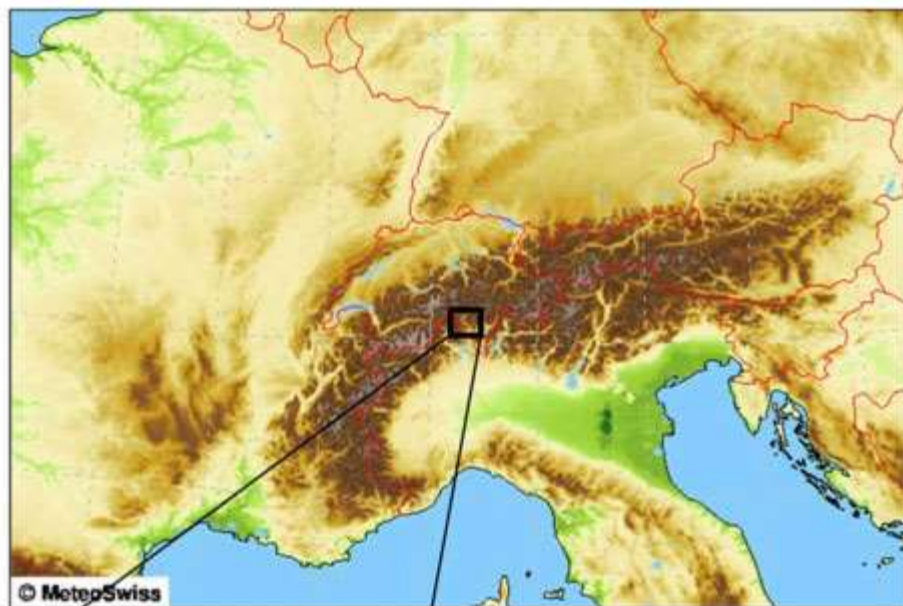


COSMO-1:

- 24-Stunden-Prognosen für die Schweiz
- 8 x täglich
- 1.1 km-Raster
- 1000 Ebenen
- 1040 x 700 Gitterpunkte

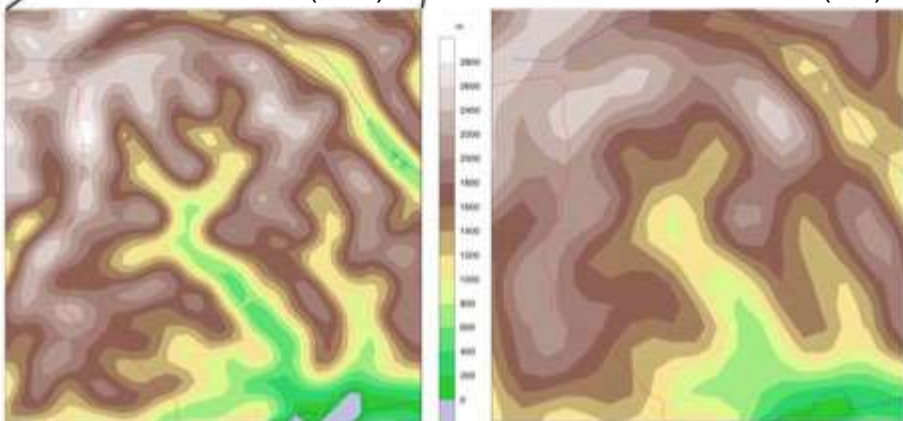


# Vorhersagemodell COSMO für die Schweiz (2)



COSMO-1 (new)

COSMO-2 (old)

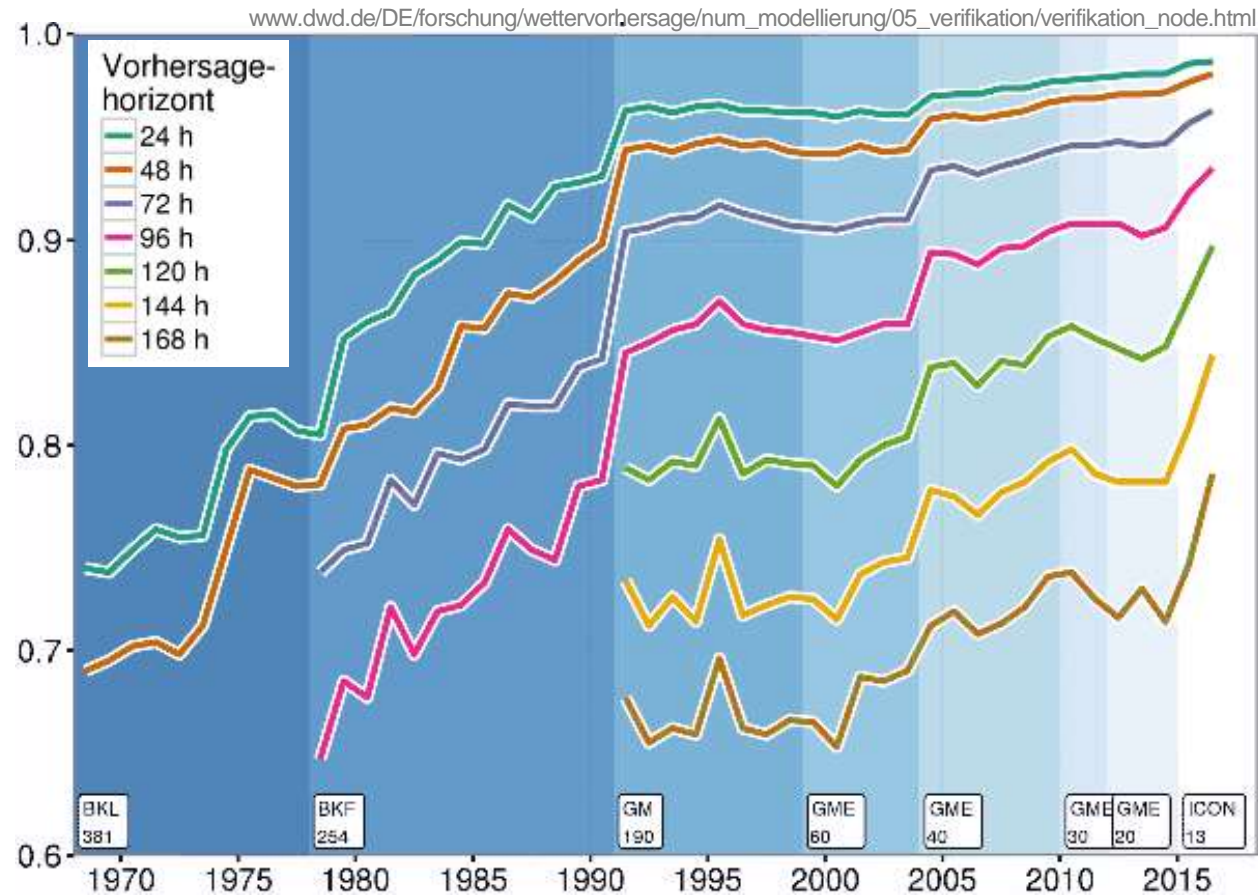


April 1, 2016 – After six months of tweaking – producing a 20 percent reduction in time-to-solution for weather forecasting – MeteoSwiss, today reported its next generation COSMO-1 forecasting system is now operational. COSMO-1 requires 20 times the computing power of COSMO-2. It improves resolution from 2.2 km to 1.1 km over COSMO-2, an important advance, particularly for Alpine topography forecasts where high spatial resolution is required to accurately predict local weather events such as thunderstorms and thermally induced mountain and valley wind systems. A single day forecast is completed in a half-hour.

Weather forecasting has always been computationally intensive. Generally speaking, a weather model samples the state of the atmosphere at a given time, and uses fluid motion and thermodynamics equations to predict the state of the atmosphere at some time in the future. The model divides a forecast region into a grid, and the equations are solved within each grid cell with interactions between the neighboring cells to compute a prediction.

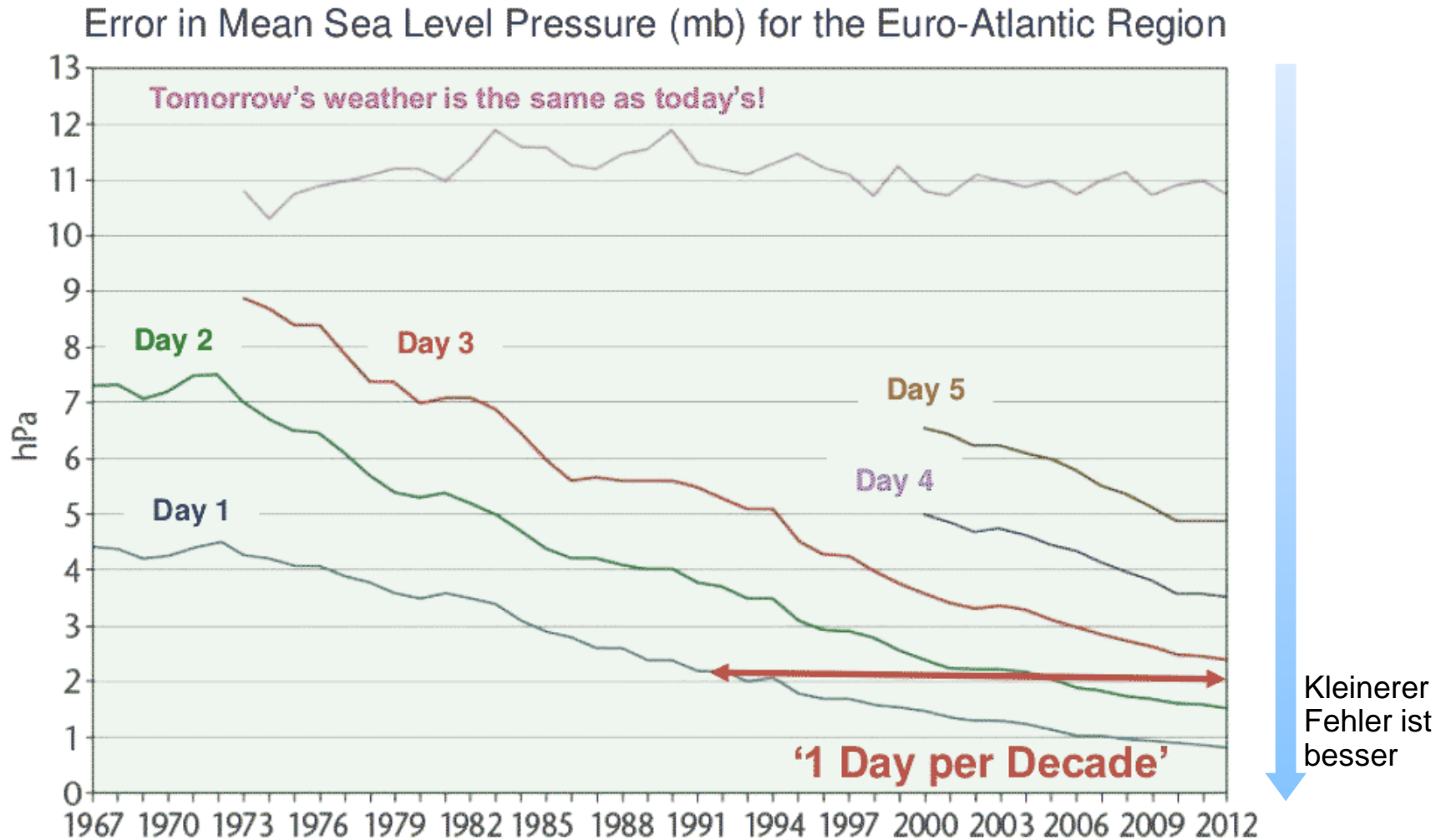
# Wetterprognose: Qualitätssteigerung

Entwicklung der **Vorhersagequalität** beim DWD, demonstriert anhand des **Tendenzkorrrelationskoeffizienten** für die Luftdruckvorhersage in Mitteleuropa. Immer schnellere Computer ermöglichten u.a. ein laufend engeres Gitter (Weite in km unter der jew. Modellbezeichnung in der Graphik), kleinere Berechnungsschritte sowie mehr Schichten in der dritten Dimension. Hinzu kamen immer wieder Optimierungen der numerischen Methoden und der meteorologischen Modelle, z.B. bei den Parametrisierungen der kleinräumigen physikalischen Prozesse, etwa die Neigung zur Turbulenzenbildung aufgrund spezieller Geländeformationen auf der Erdoberfläche. Man erkennt deutlich die dadurch erzielten Fortschritte: Die Vorhersagequalität, die im Jahre 1968 für eine 24-Stunden-Prognose erzielt wurde, wird 50 Jahre später sogar von einer 7-Tage-Vorhersage (168 h) übertroffen.



Man erkennt deutlich die dadurch erzielten Fortschritte: Die Vorhersagequalität, die im Jahre 1968 für eine 24-Stunden-Prognose erzielt wurde, wird 50 Jahre später sogar von einer 7-Tage-Vorhersage (168 h) übertroffen.

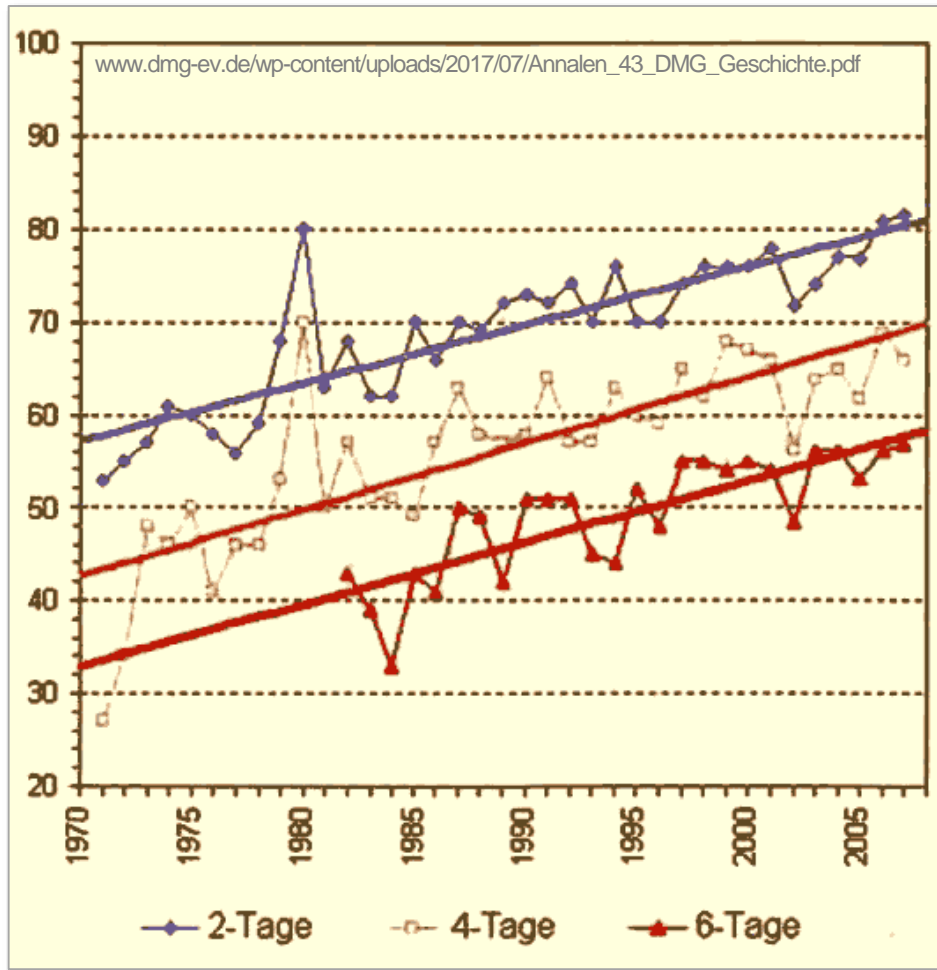
# Wetterprognose: Qualitätssteigerung (2)



Quelle: Julia Slingo, Met Office, 2013 ("Why climate models are the greatest feat of modern science")



# Wetterprognose: Qualitätssteigerung (3)

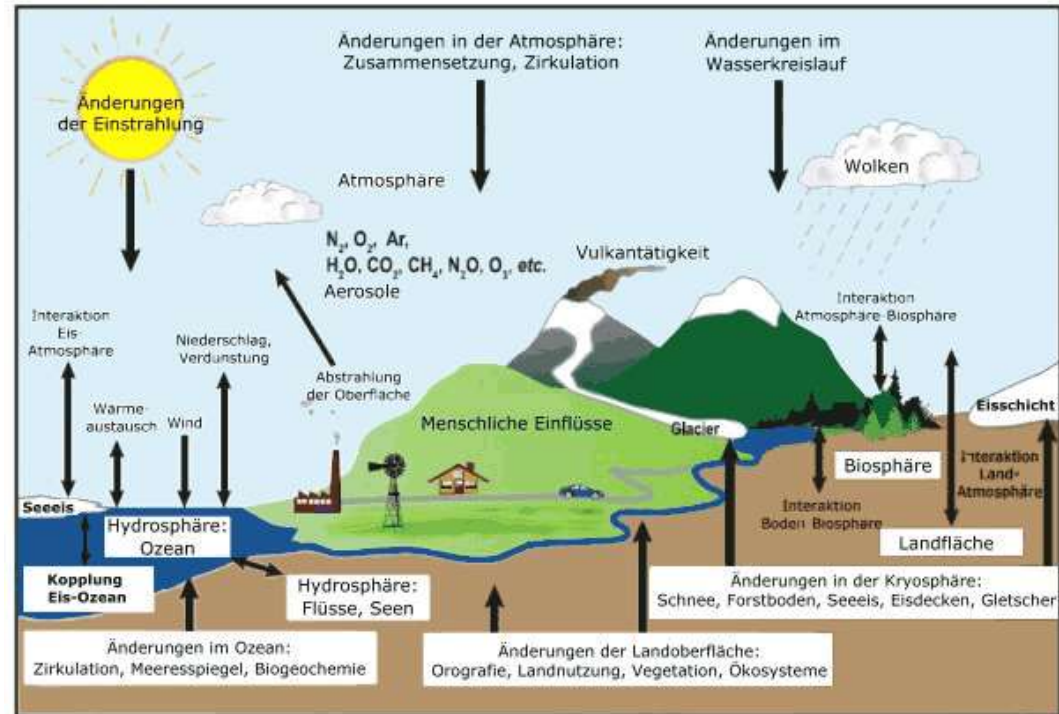


Auch an dieser knapp 40-jährigen Zeitreihe der Trefferquoten (in Prozent) der **vorhergesagten Maximaltemperaturen** (innerhalb eines zulässigen Fehlerintervalls von +/- 2 Grad) für die 2-, 4- und 6-Tagesvorhersage erkennt man klar die Steigerung der Vorhersagequalität.

# Wetter- → Klimasimulation

Bei der Modellierung und Simulation des **Klimas** spielen viel **längerfristige Zeiträume** (Jahrzehnte wenn nicht gar Jahrtausende) eine Rolle als bei der Wettervorhersage.

Die wichtigsten **Wechselwirkungen** sind in der Abbildung zusammengefasst: Änderungen der Einstrahlung verändern die Gesamtmenge an Sonnenstrahlung, die an der äusseren Atmosphäre ankommt; Änderungen in der Atmosphäre können den Anteil der reflektierten/zur Erdoberfläche durchgelassenen Strahlung verändern; und diese Änderungen können wiederum selbst beispielsweise durch geologische Ereignisse wie Vulkanausbrüche (Freisetzung von Aerosolen) oder durch menschliche Einflüsse wie Veränderungen der Vegetation oder Emission von Aerosolen in die Luft verursacht werden. Die Veränderung der Vegetation kann auch die Reflektion der Erdoberfläche verändern (dunkle Wälder etwa absorbieren mehr Sonnenlicht als Weide- und Ackerland); ebenso wirkt die Änderung der Ausdehnung von Eis- und Schneedecken. Diese reflektieren zum Beispiel bis zu 90% der einfallenden Sonnenstrahlung und beeinflussen damit insbesondere die Strahlungsbilanz der hohen Breiten und der hohen Gebirge. Ebenso komplex sind die Wechselbeziehungen mit dem Ozean. **Rückkoppelungen** gibt es viele, sie können die Erwärmung verstärken oder das Klima abkühlen.

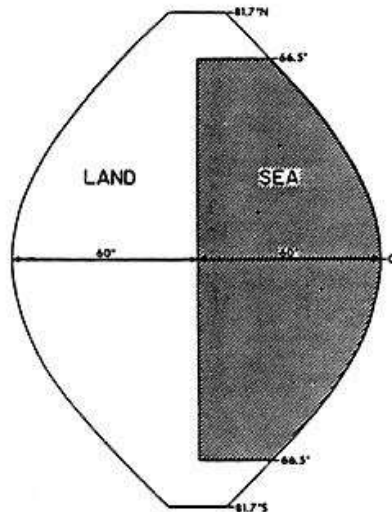


Text (gekürzt) und Bild aus [www.oekosystem-erde.de/html/klima-02.html](http://www.oekosystem-erde.de/html/klima-02.html); Bildvorlage: UN-Klimabericht, IPCC: *Climate Change 2007 – The Physical Science Basis*

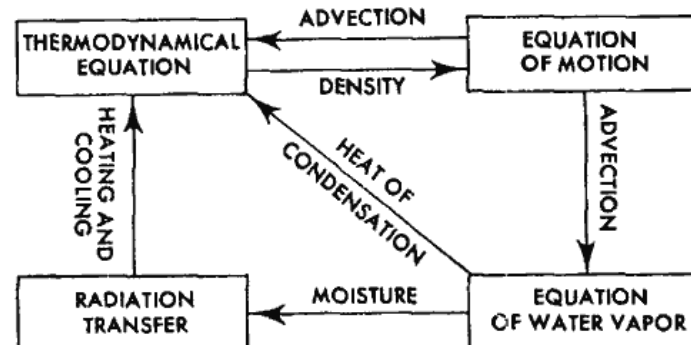
# Wetter- → Klimasimulation (2)

Die [Meilensteine der Klimamodellierung](#) in den vergangenen rund 100 Jahren werden von Leo Hickman, Journalist der britischen Tageszeitung „The Guardian“, bei [www.carbonbrief.org/timeline-history-climate-modelling](http://www.carbonbrief.org/timeline-history-climate-modelling) in netter und instruktiver Weise dargestellt; daraus einige kurze Zitate:

The climate models used by scientists today rely on some of the world's most advanced supercomputers. It can take dozens of highly skilled people to build and then operate a modern-day climate model. However, less than a century ago, climate models were little more than an idea; basic equations roughly sketched out on paper. [...] **1969**: Manabe and Bryan [...] produce the first “coupled” atmosphere-ocean general circulation model (GCM). Many elements are brought together and interact with each other for the first time, such as the atmosphere, oceans and ice. [...] However, the computing time needed to model the ocean elements is considerable and truly tests their Univac 1108 computer. It takes 1100 hours (about 46 days) to do just one run of the model. They are forced to use a highly simplified View of “Earth”, where a globe is split into three sections, equal parts ocean and land, with the poles omitted. **1975**: Manabe and Wetherald [...] use a 3D GCM to investigate for the first time the effects of doubling atmospheric CO<sub>2</sub> levels.



Manabe, S., & Bryan, K. (1969). Climate calculations with a combined ocean-atmosphere model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26(4), 786-789.



Manabe, S., & Wetherald, R. T. (1975). The effects of doubling the CO<sub>2</sub> concentration on the climate of a general circulation model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 32 (1), 3-15.

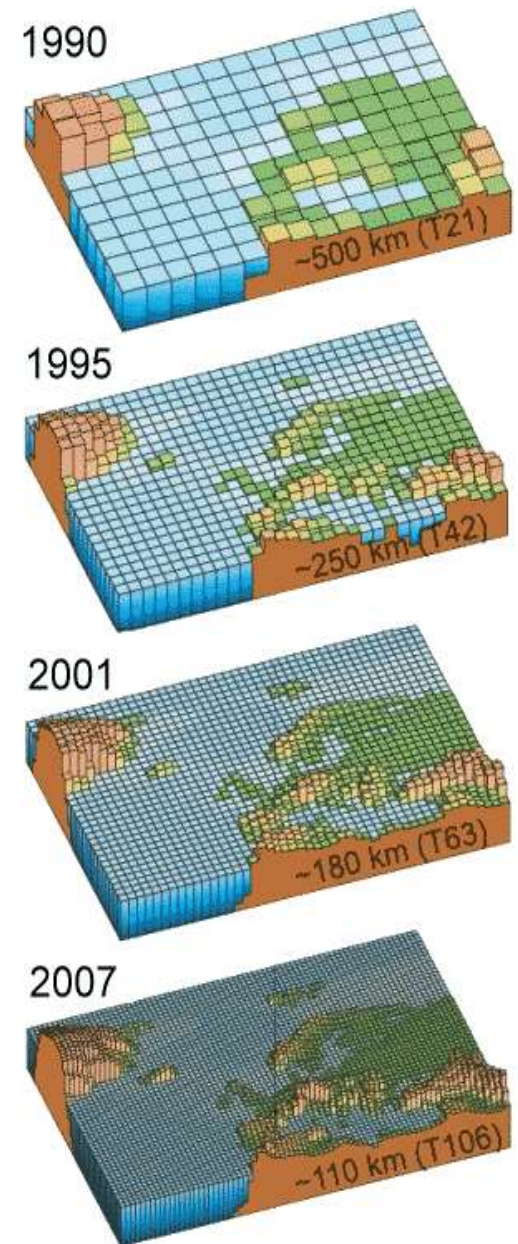


# Wetter- → Klimasimulation (3)

Die zugrundeliegenden Klimamodelle sollen diese Wechselwirkungen und Rückkoppelungen möglichst genau abbilden. Dazu werden mathematische Modelle der Atmosphäre, der Ozeane, der Schnee- und Eisdecken und der Biosphäre miteinander gekoppelt. Die Modelle werden getestet, indem Daten vergangener Zeiten eingegeben werden; die Modelle müssen die davon ausgelösten Klimaveränderungen richtig wiedergeben. Je detaillierter die Modelle die Erde und die beteiligten Prozesse abbilden, um so besser sind sie.

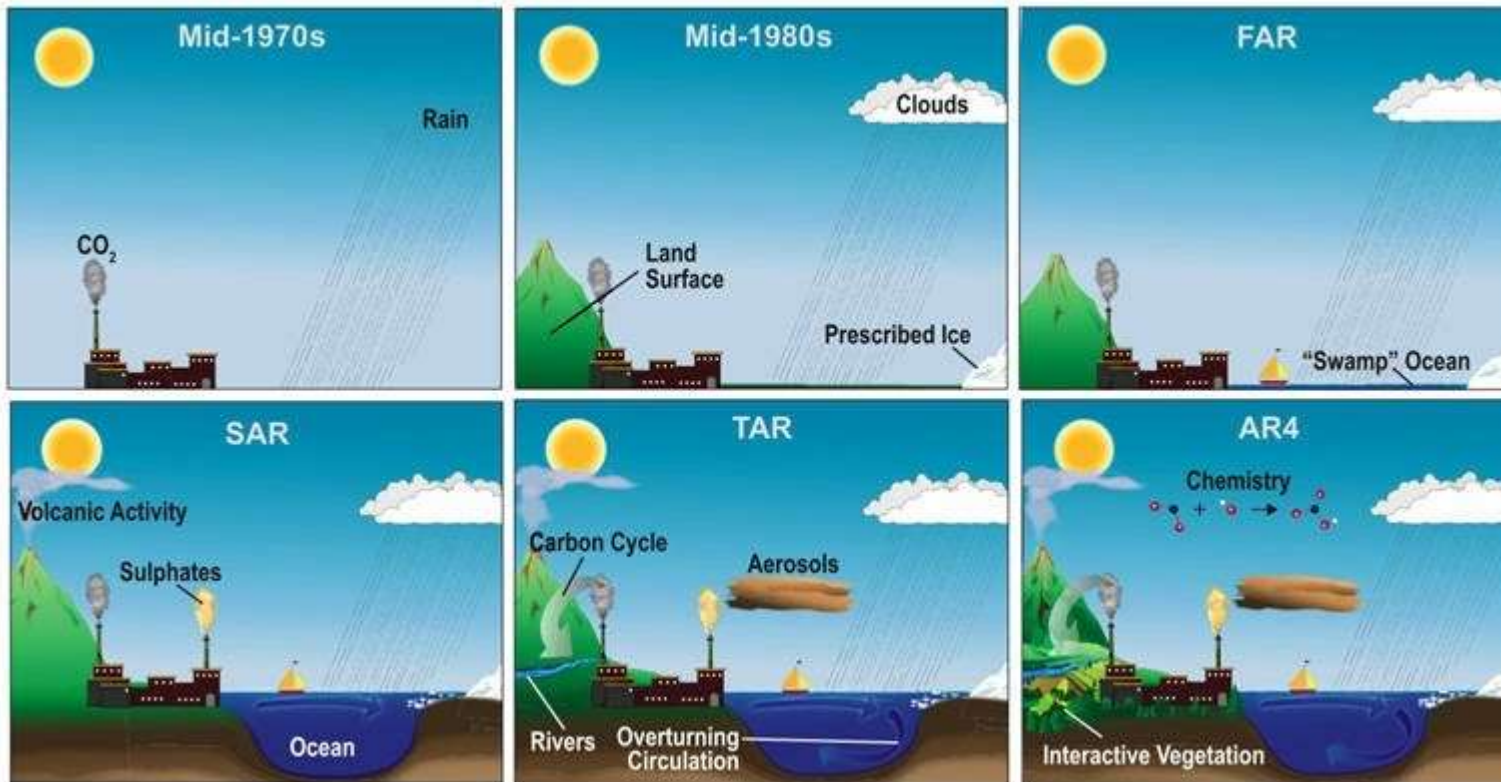
Mehr Details erfordern allerdings höhere Rechenkapazitäten. Klimamodelle sind so komplex, dass sie alle Computer an ihre Leistungsgrenze bringen; insofern sind die verwendeten Modelle gerade so detailliert, wie die aktuelle Computertechnik erlaubt. Den Fortschritt zeigt die Abbildung rechts, die die Modelle, die für den ersten, zweiten, dritten und vierten UN-Klimareport verwendet wurden, darstellt. (*Vertical resolution in both atmosphere and ocean models is not shown, but it has increased comparably with the horizontal resolution, beginning typically with a single-layer slab ocean and ten atmospheric layers in 1990 and progressing to about thirty levels in both atmosphere and ocean in 2007.*)

**Klimaänderungen sind besser vorhersagbar als das Wetter** der nächsten Tage, so paradox es erscheint, denn das kurzfristige Wetter ist von kaum vorhersagbaren, chaotischen Zufällen abhängig, die sich langfristig gegenseitig aufheben.



# Wetter- → Klimasimulation (4)

Neben einer Verfeinerung des Gitterrasters wurden die Modelle im Laufe der Zeit auch dadurch komplexer (und rechenzeitaufwändiger), dass mehr Einflussgrößen berücksichtigt wurden. Klimamodelle haben in den letzten Jahrzehnten eine enorme Entwicklung vollzogen. Während noch um 1970 ein reines Atmosphärenmodell mit CO<sub>2</sub>-Emissionen verwendet wurde, konnten in den späten 1990er-Jahren Ozeane, Schnee- und Eisdecken, Landoberflächen und Sulfat-Aerosole angekoppelt werden; um 2007 kamen Vegetation und Atmosphärenchemie hinzu.



Entwicklung der Klimamodelle nach IPCC 2007 [www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/fig/figure1-2-l.png](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/fig/figure1-2-l.png)



# Wetter- → Klimasimulation (5)

Eine Auswahl der Computersysteme des Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) in Hamburg seit seiner Gründung im Jahr 1987 mit den jeweil. Leistungskenngrößen demonstriert den technischen Fortschritt innerhalb von 30 Jahren.

Quelle: [www.dkrz.de/systeme/historie](http://www.dkrz.de/systeme/historie)



**Cyber-205**, bis März 1989: 1 Prozessor; 0.2 GFLOPS; 0.032 GB Hauptspeicher



**Cray 2S**, Nov. 1988 - Mai 1994: 4 Prozessoren; 2 GFLOPS; 1 GB Hauptspeicher



**NEC SX-6**, März 2002 - April 2009: 192 Prozessoren; 1.5 PFLOPS; 1.5 TB Hauptspeicher



**Bullx B700 DLC "Mistral"**, ab Juli 2016: 100 000 Prozessoren; 3.6 PFLOPS; 240 TB



# Wetter- → Klimasimulation (6)



www.dkrz.de/systeme/hpc

Die Komponenten des 2015 / 2016 installierten Hochleistungsrechnersystems „Mistral“ am Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) in Hamburg sind auf 79 tonnenschwere Schränke verteilt, die untereinander mit Bündeln von Glasfaserleitungen verbunden sind. Mistral besteht aus rund 3300 Rechnerknoten mit insgesamt mehr als 100 000 Prozessorkernen. Weitere Systemdaten: Spitzenrechenleistung 3.6 PetaFLOPS; Hauptspeicher ca. 266 TB; Festplattensystem mit 54 PB; Anbindung mit 2 x 3500 MBit/s zum Deutschen Forschungsnetz bzw. Internet. Aufgabe des DKRZ ist die Bereitstellung von Rechenleistung sowie die technische Unterstützung bei Modell- und Simulationsrechnungen der grundlagenorientierten Klimaforschung.

# Wetter- → Klimasimulation (7)

## Beängstigender Blick in die Klimazukunft der Schweiz

*Präzise Szenarien schaffen Grundlage für die Anpassungsstrategie des Bundesrats*

CHRISTIAN SPEICHER

Die Schweiz ist besonders stark vom Klimawandel betroffen. Ein Bericht zeigt auf, was konkret auf uns zukommt und wie wir uns dagegen wappnen können.

Der Hitzesommer 2018 hat es deutlich gemacht: Bei der Anpassung an den Klimawandel besteht noch Handlungsbedarf. Das tangiert nicht nur die Land- und die Forstwirtschaft. Auch Energieversorger, Landschaftsplaner und Architekten müssen der Tatsache ins Auge blicken, dass sich die klimatischen Bedingungen in der Schweiz rasch verändern. Worauf man sich einzustellen hat, zeigt ein vom Bund in Auftrag gegeben Bericht, der am Dienstag vorgestellt wurde. Die Klimaszenarien 2018 sind ein wichtiges Instrument für den Bundesrat, der im nächsten Jahr seine Strategie für die Anpassung an den Klimawandel aktualisieren muss.

Für die Klimaszenarien 2018 hat sich Meteo Schweiz mit Forschern der ETH Zürich und der Universität Bern zusammengesetzt. Um den besonderen Verhältnissen im Alpenland Schweiz gerecht zu werden, haben die Forscher globale Klimamodelle mit regionalen

kombiniert. Dank der hohen räumlichen Auflösung der Computersimulationen können sie nicht nur Aussagen über die Schweiz als Ganzes machen. Es lassen sich auch regionalspezifische Prognosen für verschiedene Landesteile machen.

Die Klimazukunft der Schweiz hängt massgeblich davon ab, wie sich die Treibhausgasemissionen in den nächsten Jahrzehnten entwickeln werden. Im ungünstigsten Fall muss man laut dem Bericht zwischen 2045 und 2075 mit einer Erwärmung von 2 bis 3,3 Grad gegenüber dem Vergleichszeitraum von 1981 bis 2010 rechnen. Im Zeitraum 2070 bis 2100 wäre sogar eine Erwärmung von 3,3 bis 5,4 Grad wahrscheinlich.

Ohne Klimaschutz steigen nicht nur die mittleren Temperaturen. Es wird im Sommer auch mehr und extremere Hitzetage geben. So könnte der wärmste Tag des Jahres bis Mitte des Jahrhunderts um 2 bis 5,5 Grad heisser sein als im Vergleichszeitraum. Und anders als heute dürfte es nicht nur einmal im Jahr über-

### Aufruf zu Anpassung und Widerstand

durchschnittlich heiss werden, sondern im Schnitt 4 bis 18 Mal. Längere Hitze-

perioden wie in diesem Sommer könnten also bald schon typisch sein.

Auch lange Trockenperioden dürften schon bald an der Tagesordnung sein. So zeigen die Simulationen, dass die Sommerniederschläge bis 2060 tendenziell abnehmen. Zwar wird an einem durchschnittlichen Regentag ähnlich viel Regen fallen wie heute. Es gibt aber mehr Tage ohne Regen. Deshalb könnte die längste Trockenperiode im Schnitt bis zu neun Tage länger dauern als heute. Wenn der Regen aber kommt, dann heftig. Laut den Klimaszenarien dürften die Tage mit den stärksten Niederschlägen bis Mitte des Jahrhunderts zehn Prozent mehr Regen bringen. Und auch die sogenannten Jahrhundertereignisse verstärken sich.

Das sind besorgniserregende Aussichten. Die gute Nachricht ist, dass sich bis 2060 rund die Hälfte der negativen Folgen vermeiden liesse, wenn man die Treibhausgasemissionen im Einklang mit den Klimazielen von Paris senken würde. In diesem Fall wäre bis 2060 in der Schweiz nur mit einem Temperaturanstieg von 0,7 bis 1,9 Grad zu rechnen.

Qualitativ seien diese Aussagen nicht neu, sagt der Klimaforscher Reto Knutti von der ETH Zürich, einer der Autoren der Studie. Im Vergleich zu den Klima-

Dank der hohen räumlichen Auflösung der Computersimulationen [...] könne man jetzt viel genauer quantifizieren, mit welchen Folgen in der Schweiz zu rechnen sei.

NZZ, 14.11.2018, Titelseite

szenarien 2011 könne man jetzt aber viel genauer quantifizieren, mit welchen Folgen in der Schweiz zu rechnen sei.

Knutti hofft deshalb, dass sich die Klimaszenarien in Zukunft zu einem wichtigen Instrument für Behörden, Politik und Wirtschaft entwickeln. So wie man heute ganz selbstverständlich eine Wetter-App konsultiert, bevor man einen Ausflug plane, werde man in Zukunft für diverse Planungsaufgaben auf verlässliche Klimadaten zurückgreifen können.

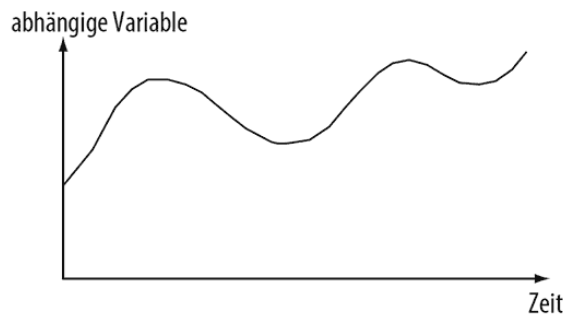
Damit die Klimainformationen den Weg zum Anwender fänden, habe man besonderen Wert auf Nutzerfreundlichkeit gelegt, sagt der Projektleiter Andreas Fischer von Meteo Schweiz. Neben dem eigentlichen Bericht habe man eine ganze Palette von Produkten entwickelt, um Nutzern den Zugang zu den Daten zu erleichtern. Unter anderem gebe es einen Web-Atlas, in dem 20 000 Grafiken hinterlegt seien. Jeder Anwender finde hier regionalspezifische Antworten zu Hitzetagen, Tropennächten oder anderen Klimaindikatoren. Diese Praxisrelevanz sei enorm wichtig, so Fischer. Denn nur so könnten die Klimaszenarien politische und wirtschaftliche Entscheidungen beeinflussen.

# Zurück zum nüchternen Ernst unseres Themas:

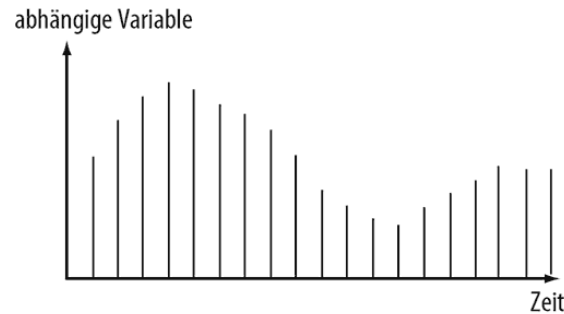
## Simulationstechnik für dynamische Systeme

- 1) Zeitgesteuerte Simulation
- 2) Ereignisgesteuerte Simulation

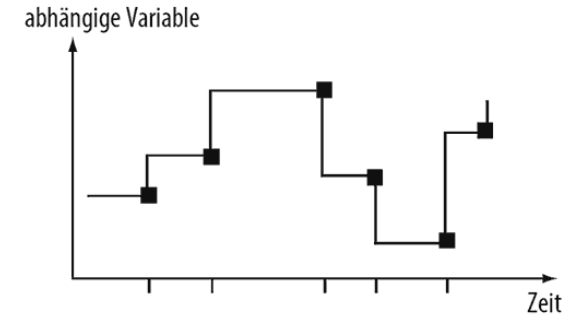
} Zeitdiskrete Simulation



*Kontinuierlicher Verlauf*



*Zeitdiskret mit äquidistanten Zeitpunkten, gesteuert durch eine getaktete Uhr*



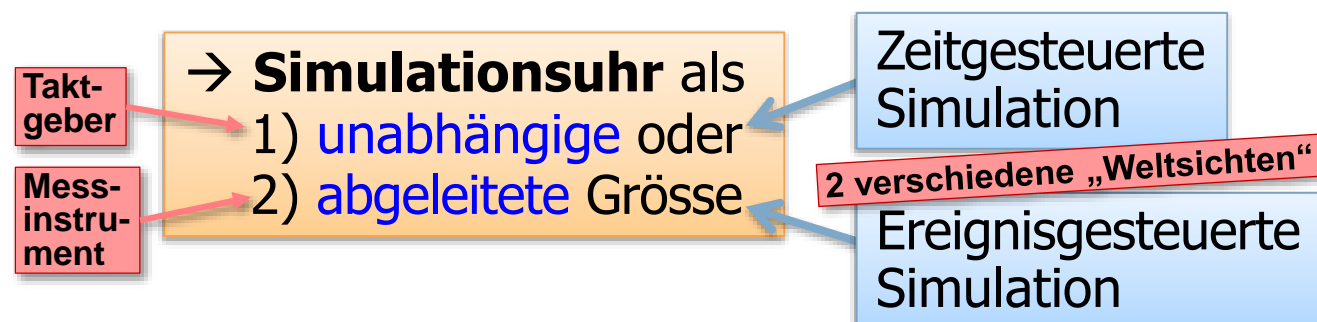
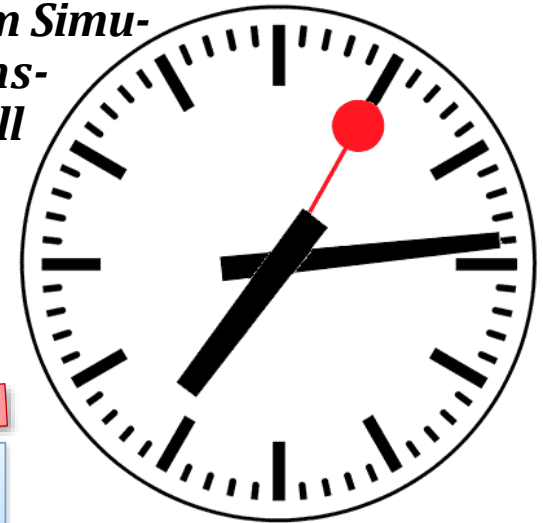
*Zeitdiskret, aber ereignisorientiert: Zeitpunkte werden durch stattfindende Ereignisse definiert*



# Zeitdiskrete Simulation

- Entwicklung eines **Systems bzw. Modells** in der **Zeit** untersuchen
  - System / dessen Modell besteht aus vielen (**z.T. interagierenden**) **Objekten**
  - Modellzustand Schritt für Schritt („**Zeitschritt**“) fortschreiben
  - Kontinuierliche Abläufe werden „diskretisiert“ → **zeitdiskrete** Simulation („diskret“: abgegrenzt, getrennt, vereinzelt; lat. *discernere* → *unterscheiden*)
- Zum simulierten Modell gehört auch eine **Simulationsuhr**
  - Zeigt die aktuelle **Zeit des Modells** („Simulationszeit“)
  - Abbild der realen Zeit im Modell, aber **diskretisiert** (d.h. „gerastert“)

*Zeit im Simulationsmodell*



Klassische Philosophie: Frage nach dem „primus motor immobilis“

# Zeitgesteuerte Simulation

- Pro **Simulationsschritt**: Erhöhe Simulationsuhr um festes  $\Delta t$ 
  - $\Delta t$  zu klein  $\rightarrow$  langsam
  - $\Delta t$  zu gross  $\rightarrow$  ungenau / falsch
  - Evtl. „Totzeiten“ (*derzeit nix los*)  $\rightarrow$  Verschwendung von Rechenzeit

Diskretisierungsproblem

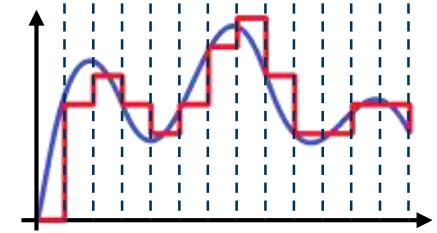
1874: Zeitgesteuerte Simulation beim Kriegsspiel



Das ist etwas anderes als die Zeit im Simulationsmodell!

*Une majestueuse horloge en carton...*

# $[T, T+\Delta t]$ -Epochen



- Was real innerhalb von  $[T, T+\Delta t]$  geschieht, wird erst am Ende der Epoche, zum Zeitpunkt  $T+\Delta t$ , in der Simulation **wirksam**
  - → **Ungenauigkeiten** / Fehler insbes. bei kontinuierlichen Abläufen
- Zustandsänderung eines Objektes wirkt sich frühestens in der nächsten Epoche auf die anderen Objekte aus

- Falls  $\Delta t$  hinreichend klein:  
**Quasi-kontinuierliche** Simulation  
(vergleiche Video aus vielen statischen Einzelbildern pro Sekunde)



Fehler hier kein Problem, da für sichtbare Wirkung zu klein

- Auf allen Objekten sollte die jeweilige Zustandsänderung einer Epoche  $[T, T+\Delta t]$  **unabhängig** ausgeführt werden können
  - „**Gleichzeitig**“ in Simulationszeit, d.h. in beliebiger Reihenfolge bei der Simulation einer Epoche

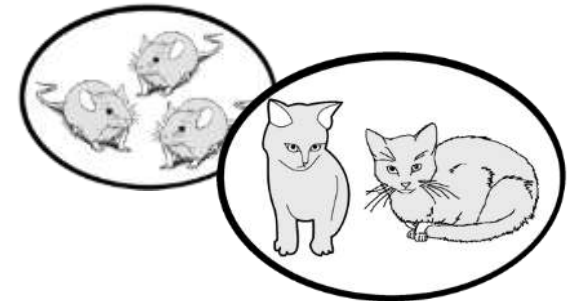
Denkübung: Wie hängen die Begriffe „unabhängig“, „gleichzeitig“, „beliebige Reihenfolge“ zusammen?



# Ein Beispielproblem

- Dorfbewohner bauen **Weizen** an
- **Ernte** im Juli beträgt **2000 t**
  - Wird in einer Scheune gelagert
- **Pro Monat** werden **100 t** verbraucht
- **Mäuse** in der Scheune fressen auch Weizen
- Aber **Katzen** fressen Mäuse
  - Die Dorfbewohner sorgen (monatlich) dafür, dass der **Katzenbestand** nicht unter ein **Minimum** fällt

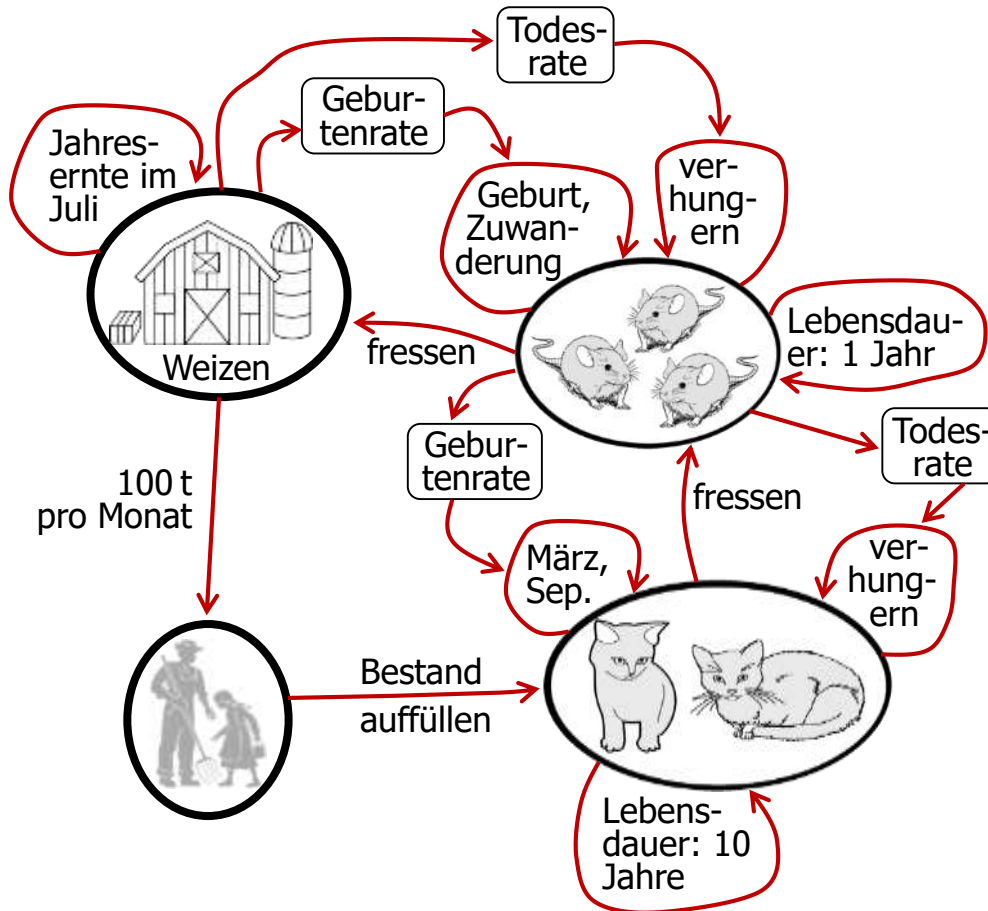
Erntemenge sollte also eigentlich ausreichen...



- 
- Typische Frage: Wie gross ist die **Weizenmenge** nach  $n$  Jahren, wenn der **minimale Katzenbestand**  $k$  beträgt?
    - Werden **mehr Katzen** benötigt?
    - Kann man **Anbauflächen stilllegen**?

McAdvisor&Co mit einem Gutachten beauftragen!

# Abhängigkeiten in der Miniwelt



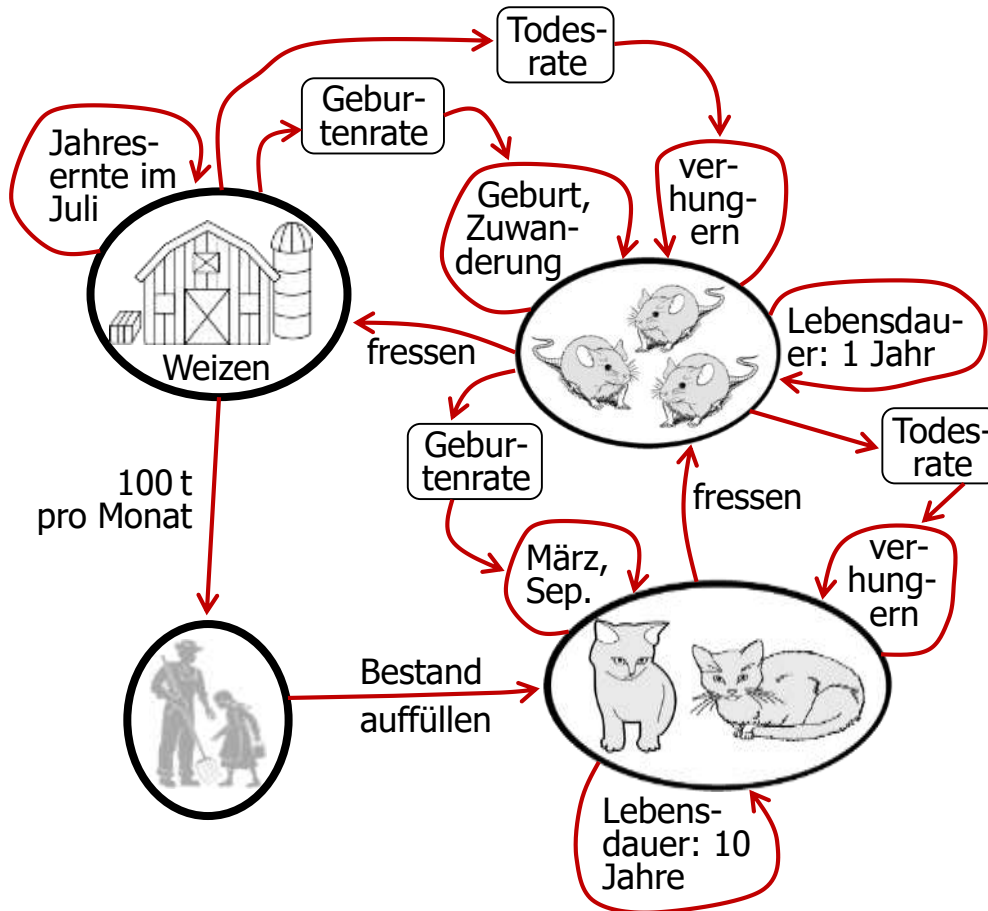
## Komplexe kausale Abhängigkeiten

- Rückkoppelungen, Regelkreise
- Zeitliche Fernwirkungen → „Regelkatastrophen“

## Dennoch stark abstrahiert gegenüber der Realität

- Bevölkerungswachstum
- Anbautechnik
- Ernteschwankungen
- Marktpreise
- Subventionspolitik
- Essgewohnheiten
- Saatgutoptimierung
- Biosprit
- ...

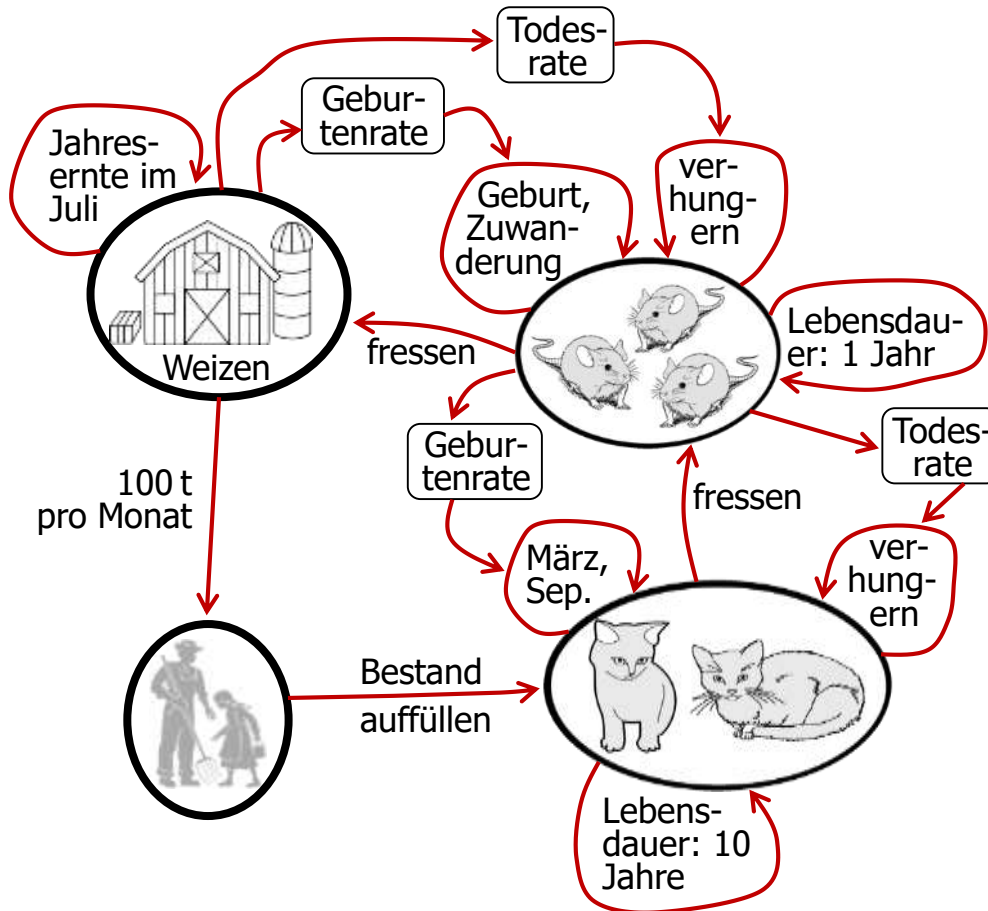
# Abhängigkeiten in der Miniwelt (2)



- Hier ist die **Semantik der Pfeile** noch etwas „diffus“
  - Dies ist also keine vollständige Problemspezifikation!
- **Analytisch-mathematisch** lassen sich solche Probleme kaum mehr behandeln
  - **Simulation** ist daher die geeignete Problemlösungstechnik



# Das Modell

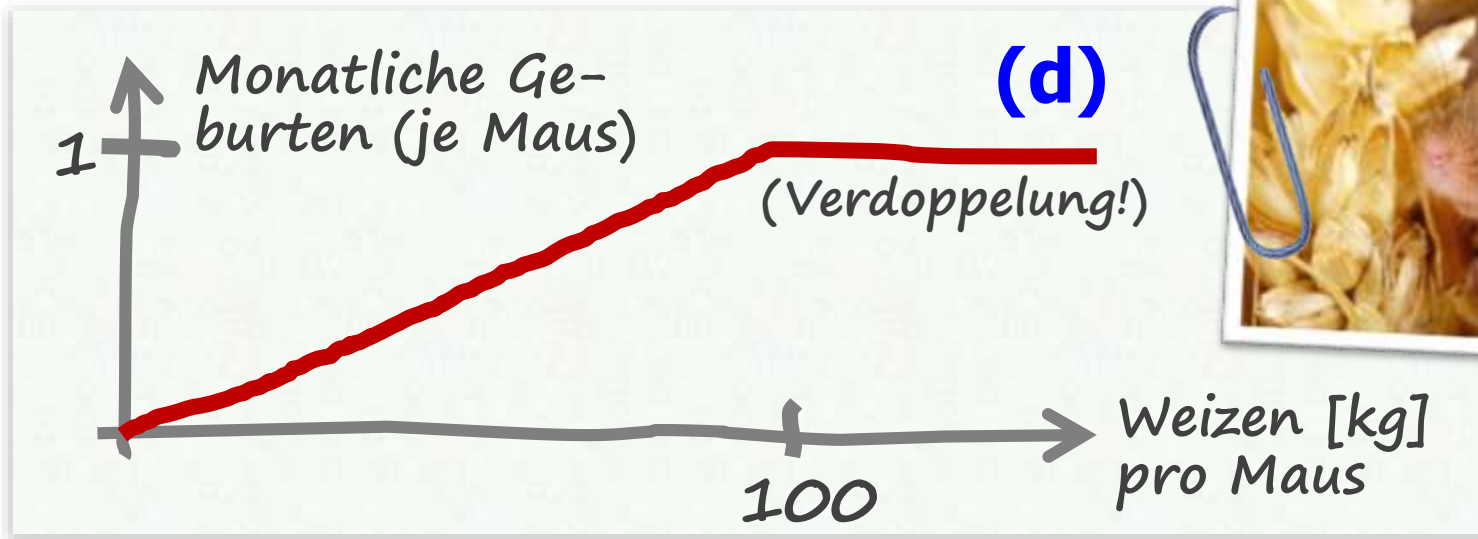


Ein Unternehmensberater von McAdvisor&Co analysiert das Weizenproduktionssystem und führt in seinem management summary sieben *key findings* auf:

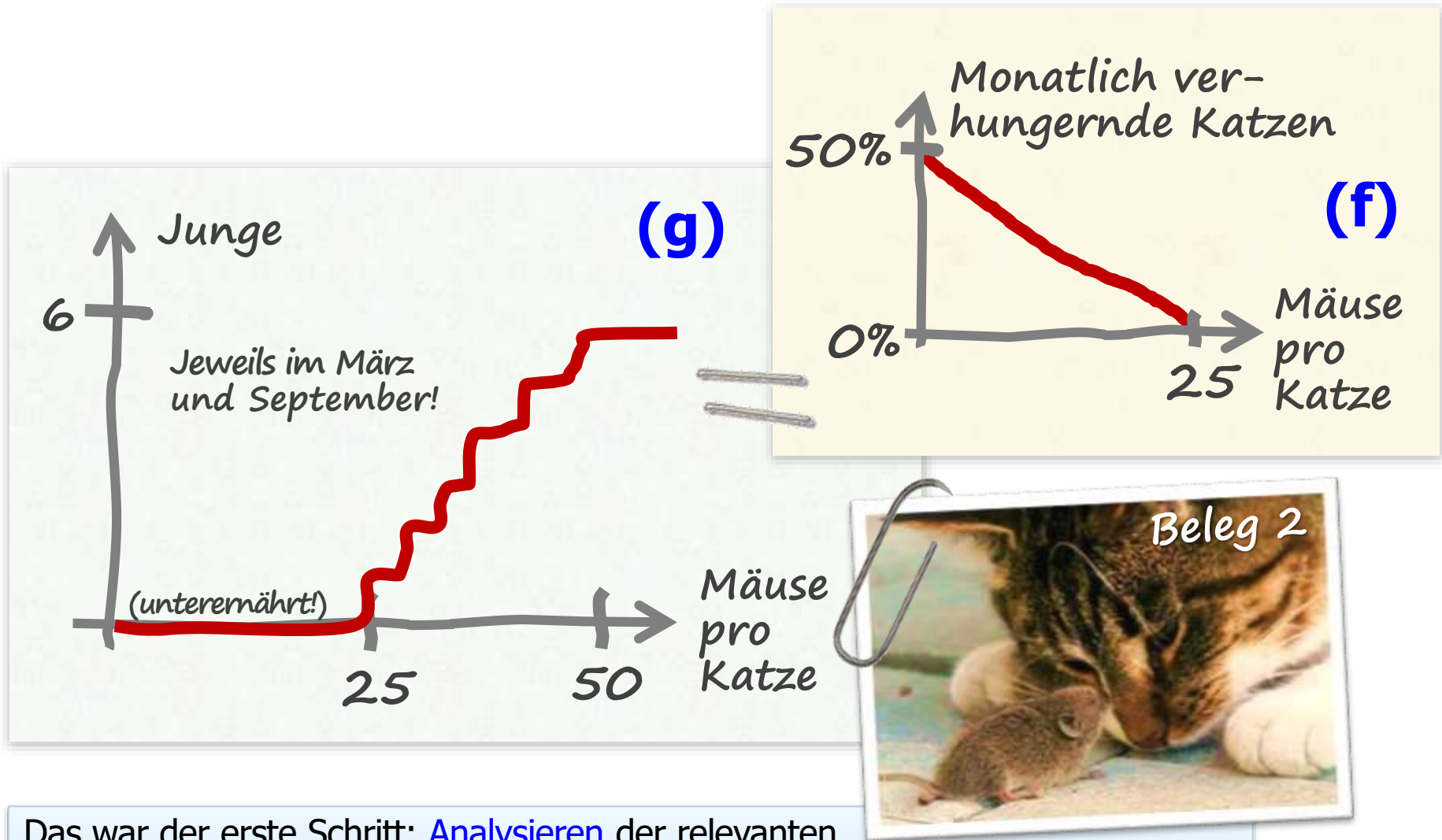
- Eine Maus frisst monatl. 15 kg Weizen.
- 1/12 aller **Mäuse** und 1/120 aller **Katzen sterben** jeden Monat an Altersschwäche.
- Wenn die **Scheune leer** ist, sterben alle Mäuse; allerdings sind dann im Folgemonat 20 neue eingewandert.

Zu den restlichen vier key findings fertigt der Berater zunächst Skizzen an →

# Beobachtung zu geborenen und gefressenen MÄUSEN



# Geburten pro weibl. Katze und verhungerende Katzen

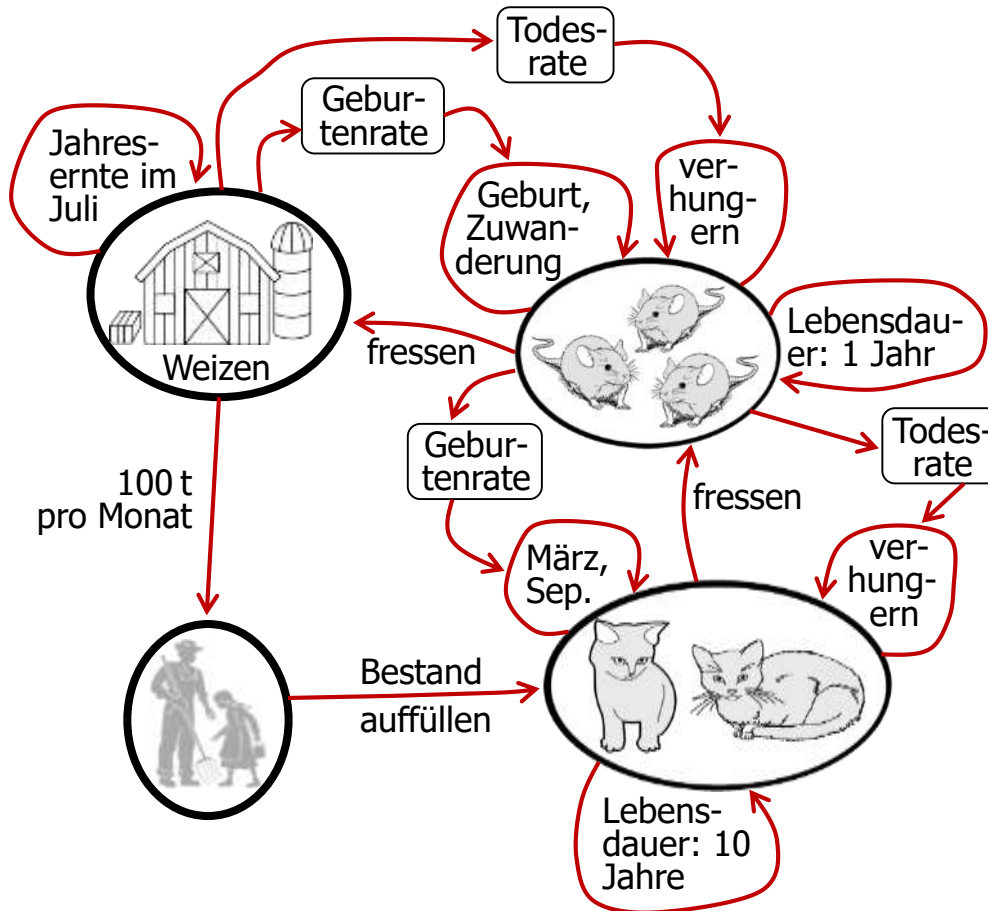


Das war der erste Schritt: **Analysieren** der relevanten Aspekte des Weltausschnitts – danach: Erstellen eines **konzeptuellen Modells**



# Das Modell (2)

...und präzisiert diese Erkenntnisse dann im Modell:



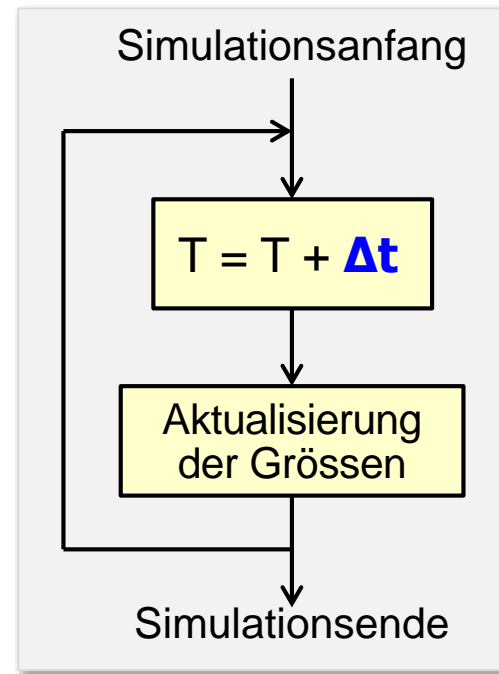
- d) Falls mehr als 100 kg Weizen pro **Maus** vorhanden ist, verdoppelt sich deren Anzahl monatlich. Ansonsten beträgt die Anzahl der monatlichen **Geburten**: Weizenmenge/100.
- e) Falls mehr als 50 Mäuse/Katze existieren, **frisst jede Katze** 30 Mäuse pro Monat. Sonst werden monatlich  $30 \times \text{Mäusezahl} / 50$  gefressen.
- f) Bei  $< 25$  Mäuse/Katze **verhungern**  $(25 \times \text{Katzen} - \text{Mäuse}) / 50$  **Katzen**.
- g) Falls mehr als 50 Mäuse/Katze existieren, produziert jede (weibliche!) **Katze** im März und September 6 **Junge**. Bei weniger als 25 Mäuse/Katzen werfen die Katzen nicht. Ansonsten werden  $3 \times (\text{Mäuse} / 25 - \text{Katzen})$  Junge geboren.

# Zeitgesteuerte Simulation des Weizen-Mäuse-Katzen-Problems

- Diskretes Zeitraster, d.h. die **Simulationszeit „springt“**
  - Wie gross sollte man  $\Delta t$  wählen?
  - Ist  $\Delta t = 1$  Monat vernünftig?
  - Aber ist der Weizenverbrauch nicht nahezu **kontinuierlich**?

- Bei jedem **Zeitschritt  $\Delta t$**  ändern sich die Grössen

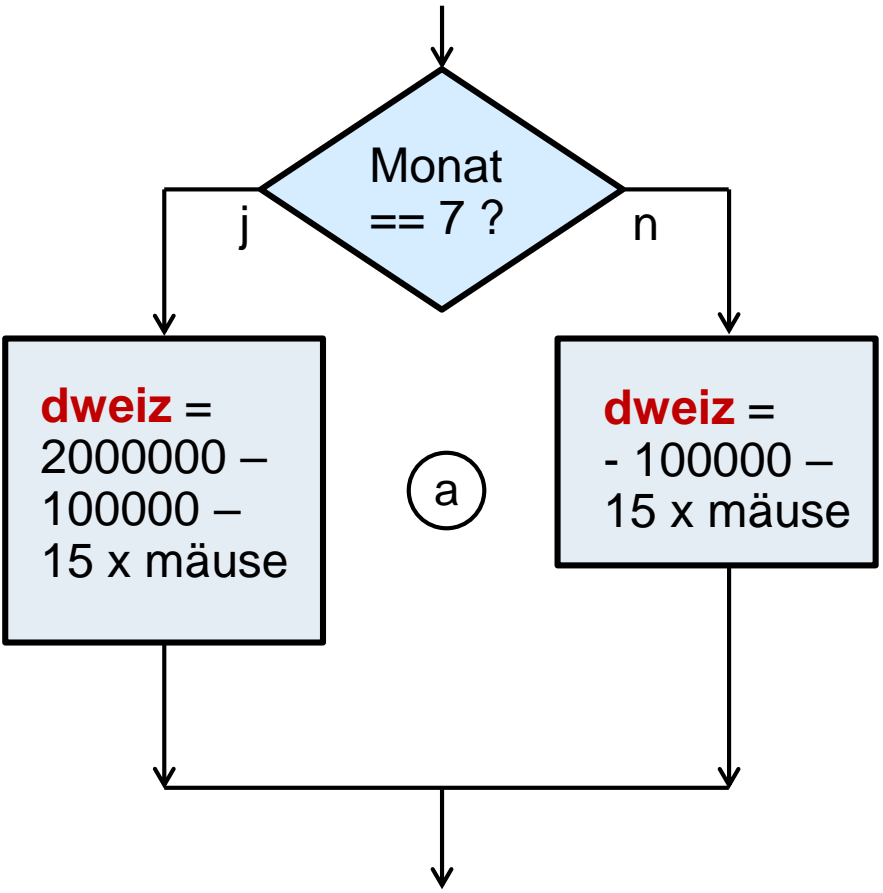
- Weizenmenge ( $\Delta$  weiz)
- Mäusezahl ( $\Delta$  maus)
- Katzenzahl ( $\Delta$  katz)



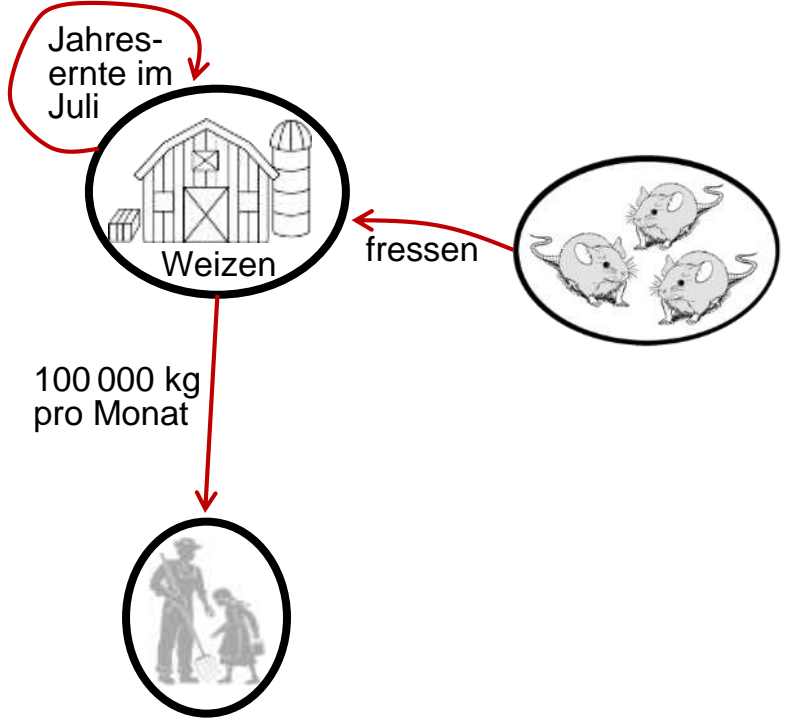
- → **Verlauf** der drei Kenngrössen **als Funktionsgraph** darstellen

# (1) Monatliche Änderung der Weizenmenge

Auf dem Weg zum programmierten Simulationsmodell: Berechnungsalgorithmus als Flussdiagramm



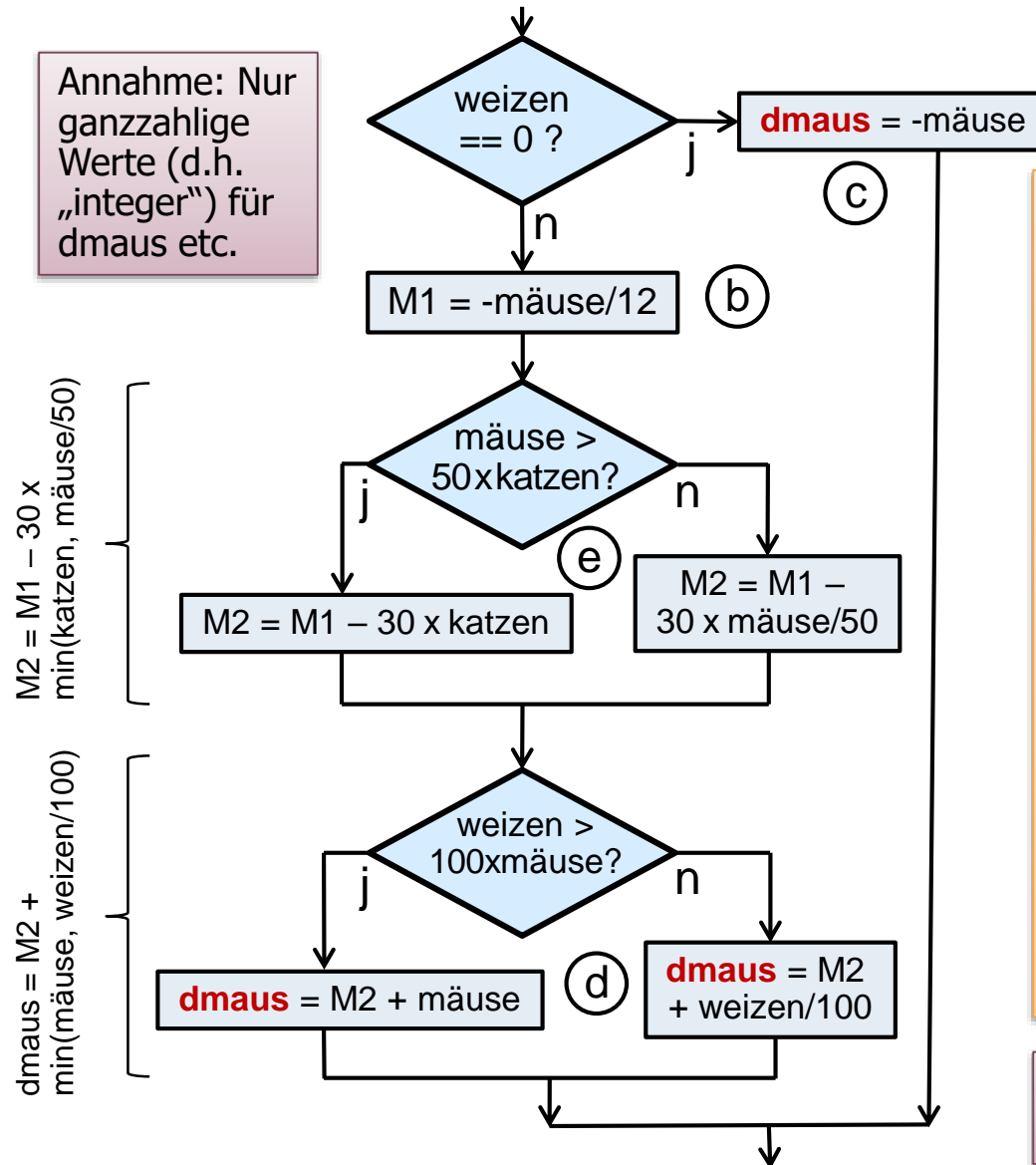
a) Jede Maus frisst 15 kg Weizen pro Monat.





## (2) Änderung der Mäusezahl

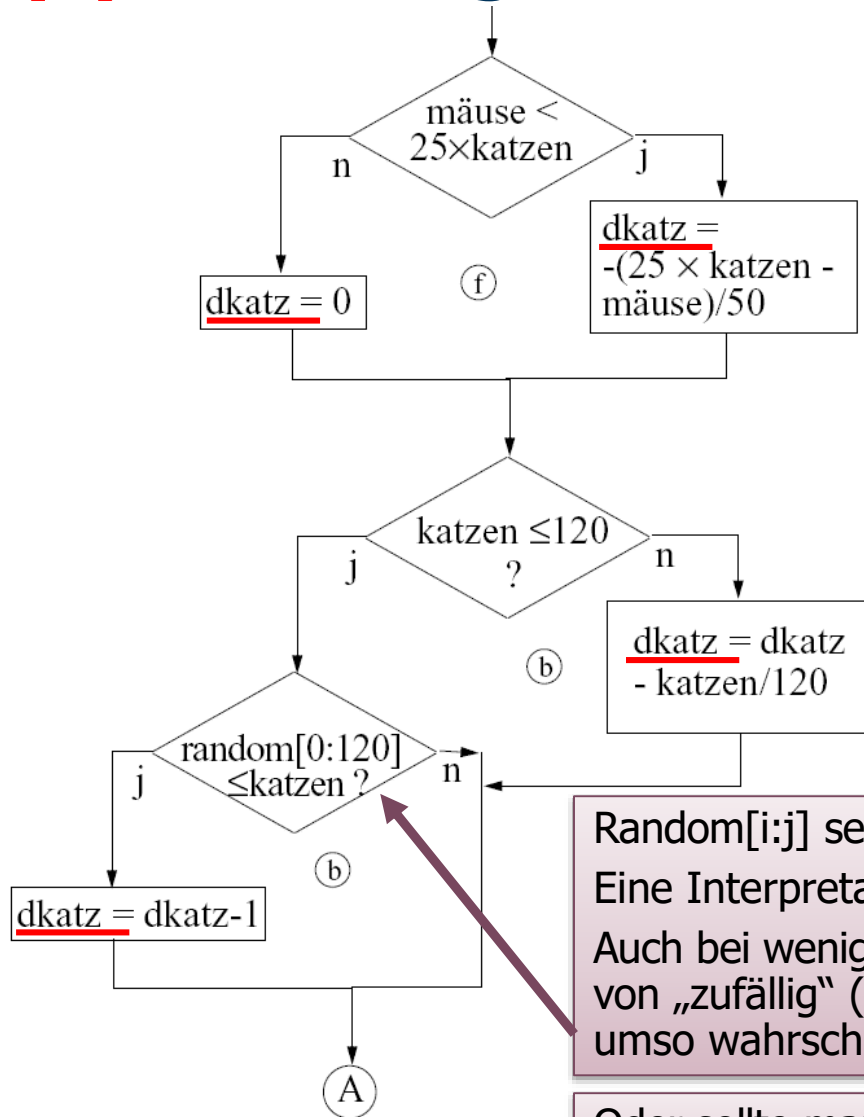
Annahme: Nur ganzzahlige Werte (d.h. „integer“) für  $d_{\text{maus}}$  etc.



- b) 1/12 aller Mäuse... sterben jeden Monat an Altersschwäche.
- c) Wenn die Scheune leer ist, sterben alle Mäuse...
- d) Falls mehr als 100 kg Weizen pro Maus vorhanden ist, verdoppelt sich deren Anzahl monatlich. Ansonsten beträgt die Anzahl der monatlichen Geburten: Weizenmenge/100.
- e) Falls mehr als 50 Mäuse/Katze existieren, frisst jede Katze 30 Mäuse pro Monat. Sonst werden monatlich  $30 \times \text{Mäusezahl}/50$  gefressen.

Denkübung: Reverse-Engineering der Flussdiagramme

### (3) Änderung der **Katzenzahl** (1. Todesfälle)



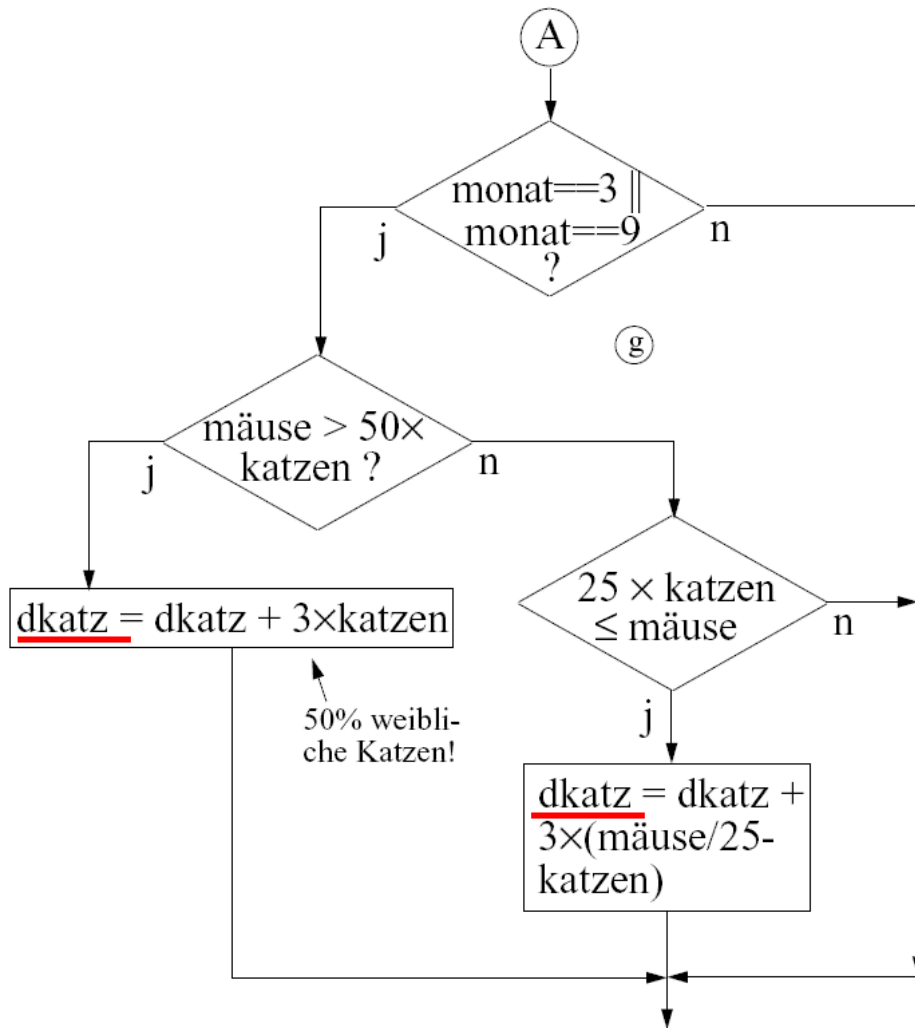
f) Bei < 25 Mäuse/Katze **verhungern** (25×Katzen - Mäuse)/50 **Katzen**.

b) ... 1/120 aller **Katzen sterben** jeden Monat an Altersschwäche.

Random[i:j] sei eine Zufallszahl (integer?) zwischen i und j.  
Eine Interpretation von Modelleigenschaft b):  
Auch bei weniger als 120 Katzen stirbt gelegentlich eine davon „zufällig“ (aber warum eigentlich nicht mehr?). Dies ist umso wahrscheinlicher, je grösser die Zahl der Katzen ist.

Oder sollte man das Modell „verstetigen“ und mit Bruchteilen von Katzen (und Mäusen) rechnen?

### (3) Änderung der **Katzenzahl** (2. Geburten)



g) Falls mehr als 50 Mäuse/Katze existieren, produziert jede (weibliche!) **Katze** im März und September 6 **Junge**. Bei weniger als 25 Mäuse/Katzen werfen die Katzen nicht. Ansonsten werden  $3 \times (\text{Mäuse} / 25 - \text{Katzen})$  Junge geboren.

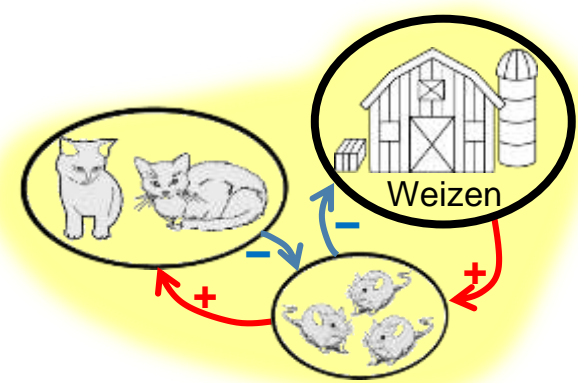
Stellen die Flussdiagramme eine adäquate Implementierung der Modellbeschreibung dar?

Gibt es wesentlich andere Interpretationen der Spezifikation?

Spiegelt das Modell die Realität überhaupt genau genug wider? Lohnt sich mehr Realitätstreue?



# Das Steuerprogramm



a) Wert von **minkatzen** eingeben (z.B. 10)

b) **Initialisieren**:

- `jahr = 1; monat = 6; weizen = 0; mäuse = 20; katzen = minkatzen`



c) In einer **Schleife** (bis z.B. `jahr == 10`):

- `monat++` ; falls `monat == 13`: {`monat = 1; jahr++`}
- Methoden aufrufen zur Bestimmung der **letzmonatlichen Veränderungen**:

- `dweiz`
- `dmaus`
- `dkatz`

Ist hier eigentlich die **Reihenfolge** der Neuberechnung der drei Kenngrößen entscheidend?

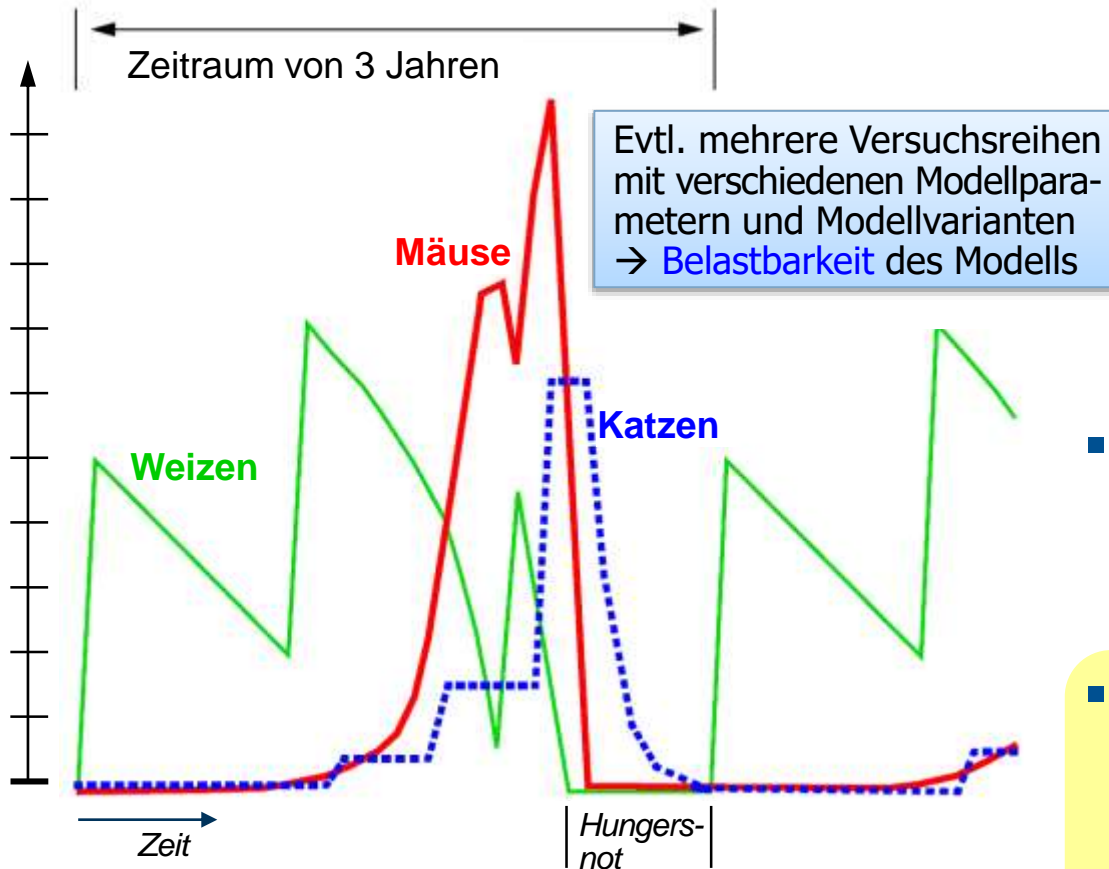
- `weizen = max(0, weizen+dweiz)`
- `mäuse = max(20, mäuse+dmaus)`
- `katzen = max(minkatzen, katzen+dkatz)`

Könnte `weizen + dweiz < 0` sein? Und was bedeutet das?

- **Ergebnis ausgeben** (z.B. Kurvenverlauf oder Balkendiagramme)
- **Versuch evtl. wiederholen** mit anderem `minkatzen`-Wert

Sensitivitätsanalyse: Reagiert das Modell empfindlich auf kleine Änderungen? (Gute Modelle sind „robust“)

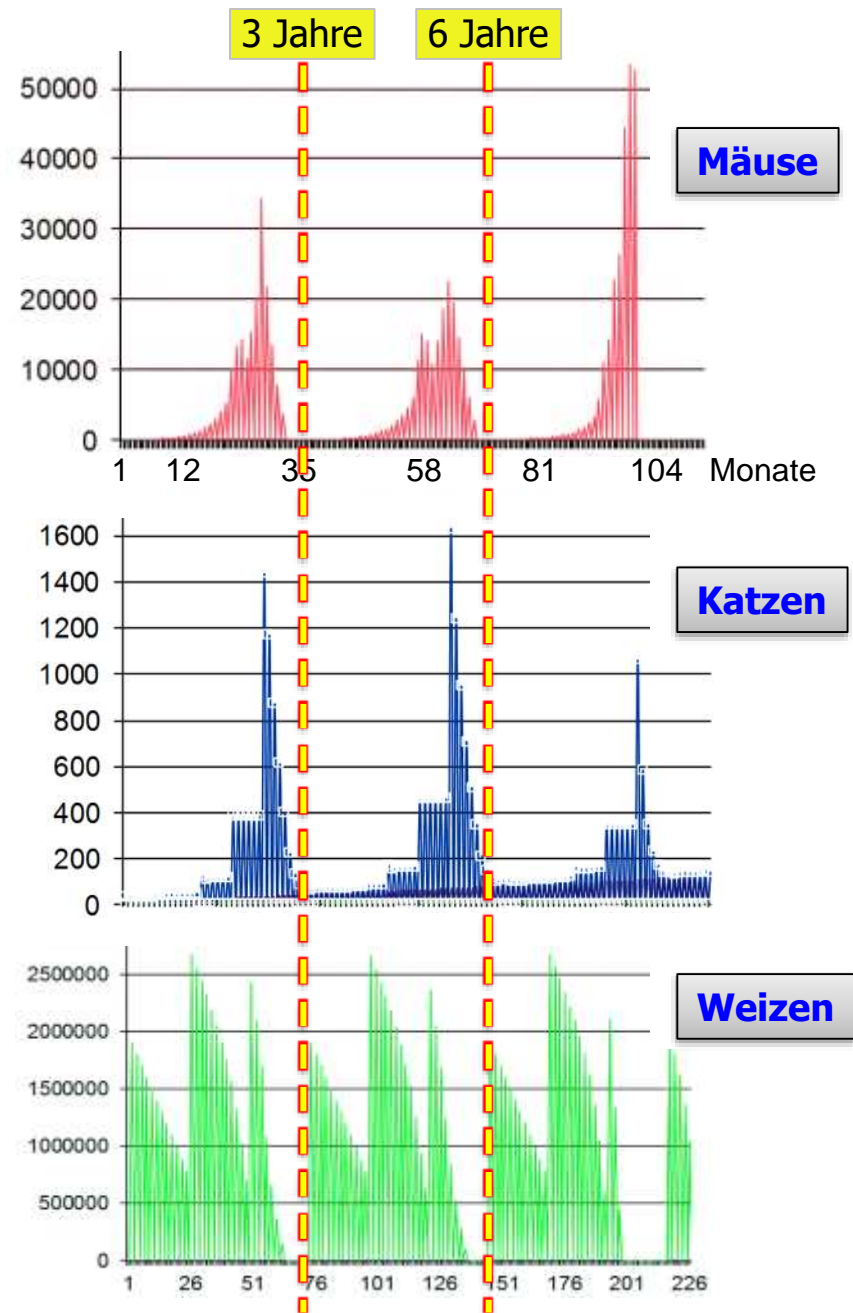
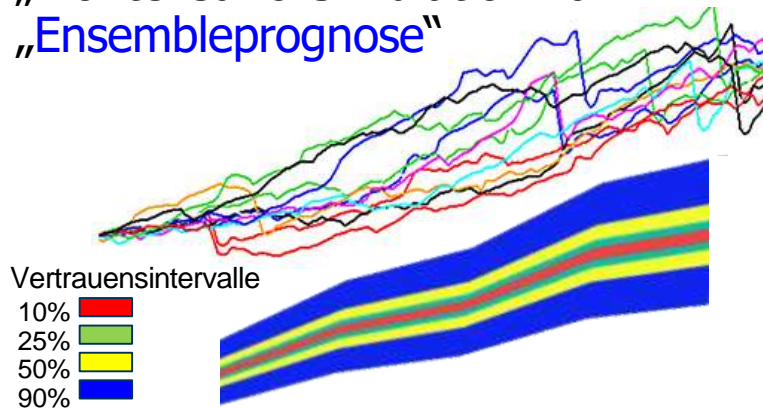
# Simulationsergebnis



- Jedes **dritte Jahr** eine **Hungersnot**
    - Exponentielle Mäusevermehrung im Vorjahr
  - Erst kein **Weizen**, dann keine **Mäuse**, dann keine **Katzen**
  - Wirkung der Katzen (bei  $\text{minkatzen} = 10$ ) auf die Mäuseplage ist nicht ausreichend!
- **Hungersnöte vermeiden?**
- Erhöhen von „minkatzen“?
  - Mehr Weizen produzieren?
  - → Möglichkeiten durchspielen!

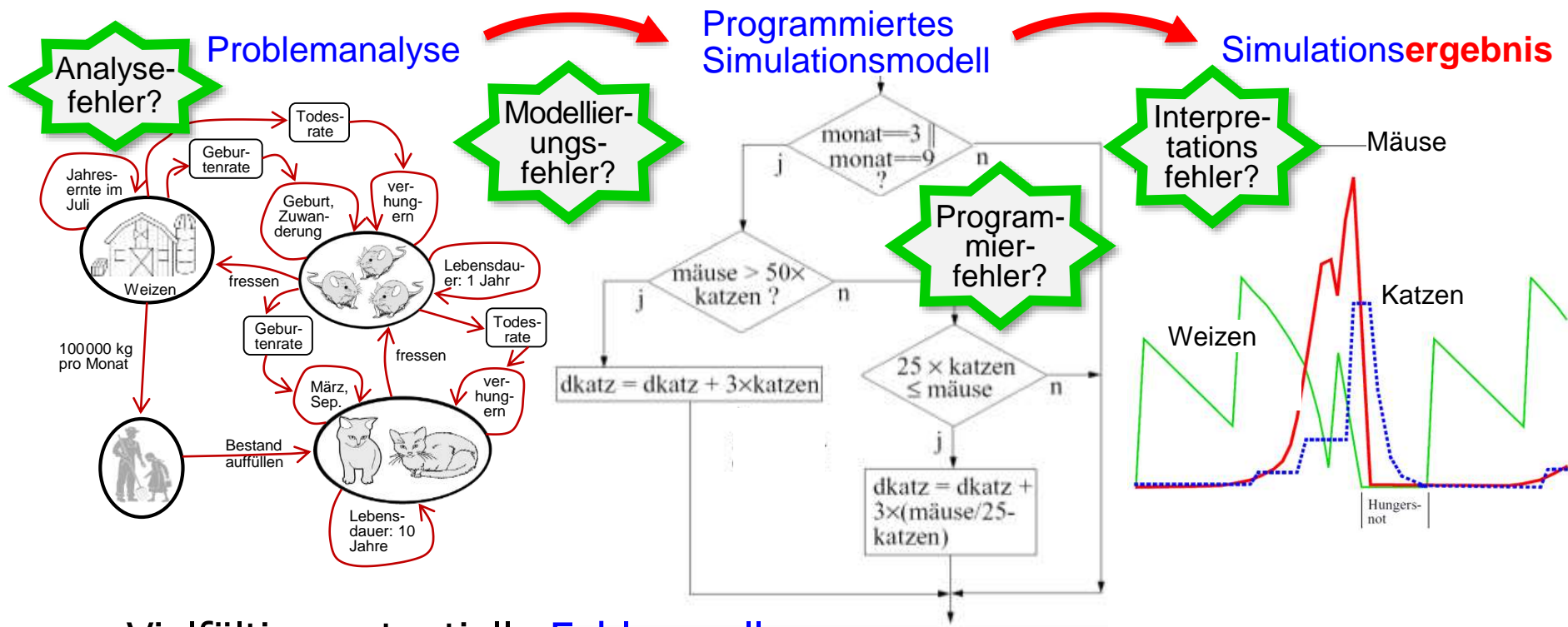
# Ergebnis einer etwas anderen Implementierung

- Ergebnis **ähnlich**, aber nicht identisch
- Welche Realisierung ist realistischer?
- Evtl. **mehr Varianz** durch stochastische Variationen einiger etwas willkürlicher „fest“gelegter Systemparameter?
  - **Sensibilität der Modellannahmen** testen
  - Wegabstrahierte Einflussgrößen evtl. als pauschale **Zufallsstörungen** modellieren
  - Mehr Vertrauen in die Aussagen durch **statistische Absicherungen**
- „Monte-Carlo-Simulation“ bzw. „Ensembleprognose“





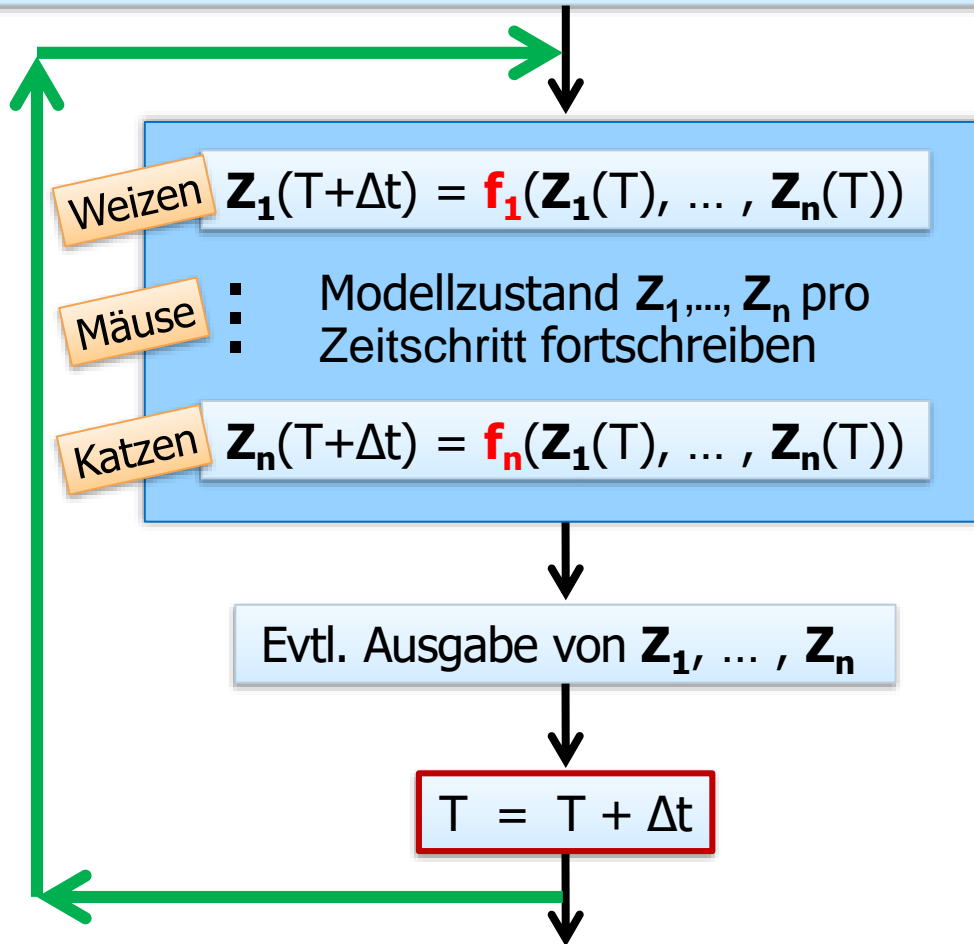
# Kann man den Simulationsergebnissen vertrauen?



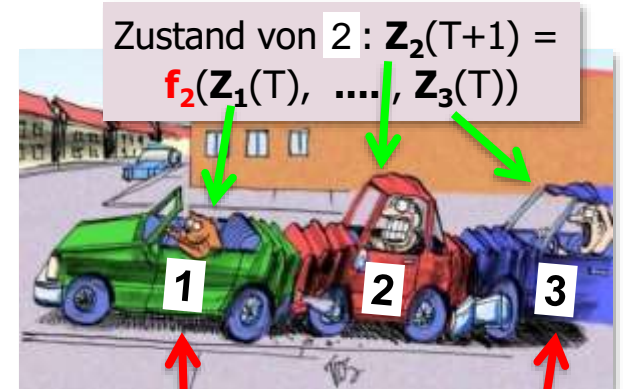
- Vielfältige potentielle Fehlerquellen
  - Ungenügendes Verständnis des „realen Systems“; Vernachlässigung relevanter Faktoren im Modell; ungenaue Modellierung; Programmierfehler; falsche Versuchsplanung; numerische Instabilität; statistische Mängel;...
- → Validierung notwendig!
  - Abgleich mit dem „ground truth“ allerdings oft nicht möglich
  - → Plausibilitätstest, Sensitivitätsanalyse, Modellvarianten,...

# Der Simulationszyklus (bei zeitgesteuerter Simulation)

Initialisiere alle **Zustandskomponenten**  $\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_n$  des Modells mit ihren jeweiligen Werten zum Zeitpunkt  $T = T_0$



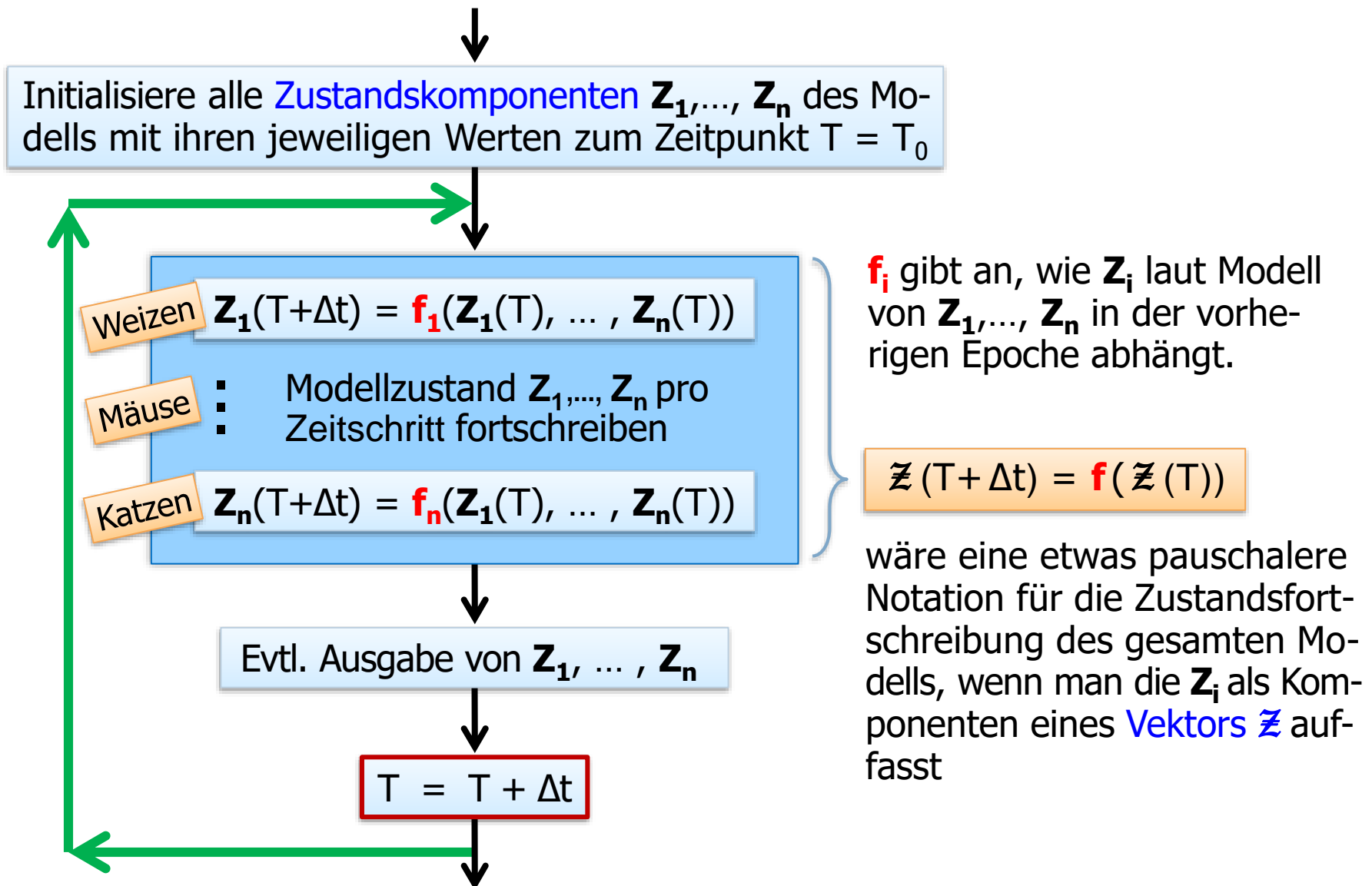
$\mathbf{f}_i$  gibt an, wie  $\mathbf{z}_i$  laut Modell von  $\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_n$  in der vorherigen Epoche abhängt.



Zum Zeitpunkt  $T$   
viel zu langsam

Zum Zeitpunkt  $T$   
viel zu schnell

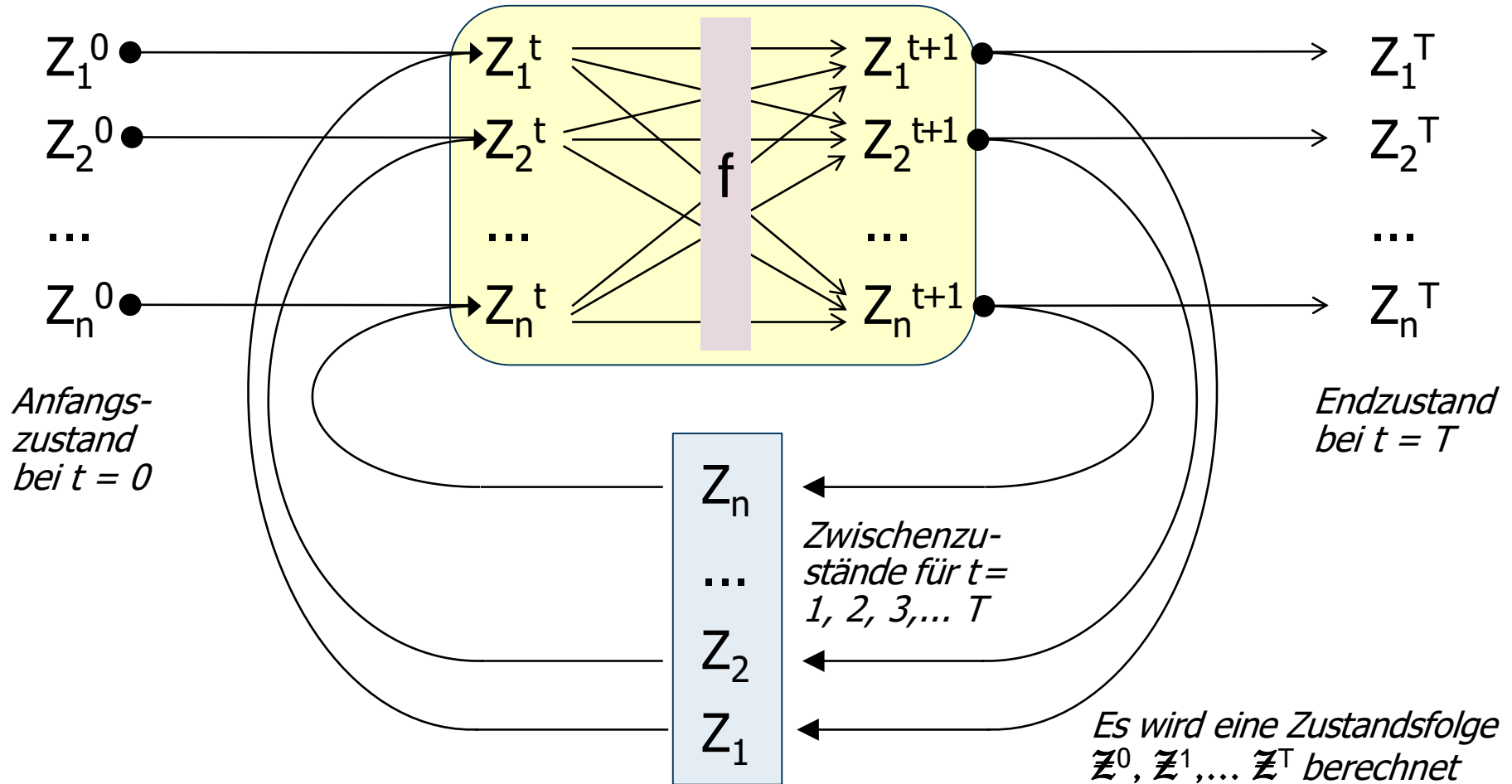
# Der Simulationszyklus (bei zeitgesteuerter Simulation)





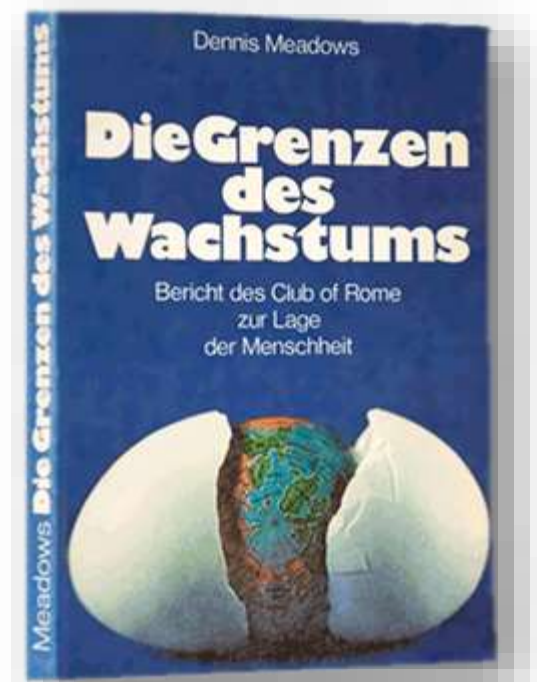
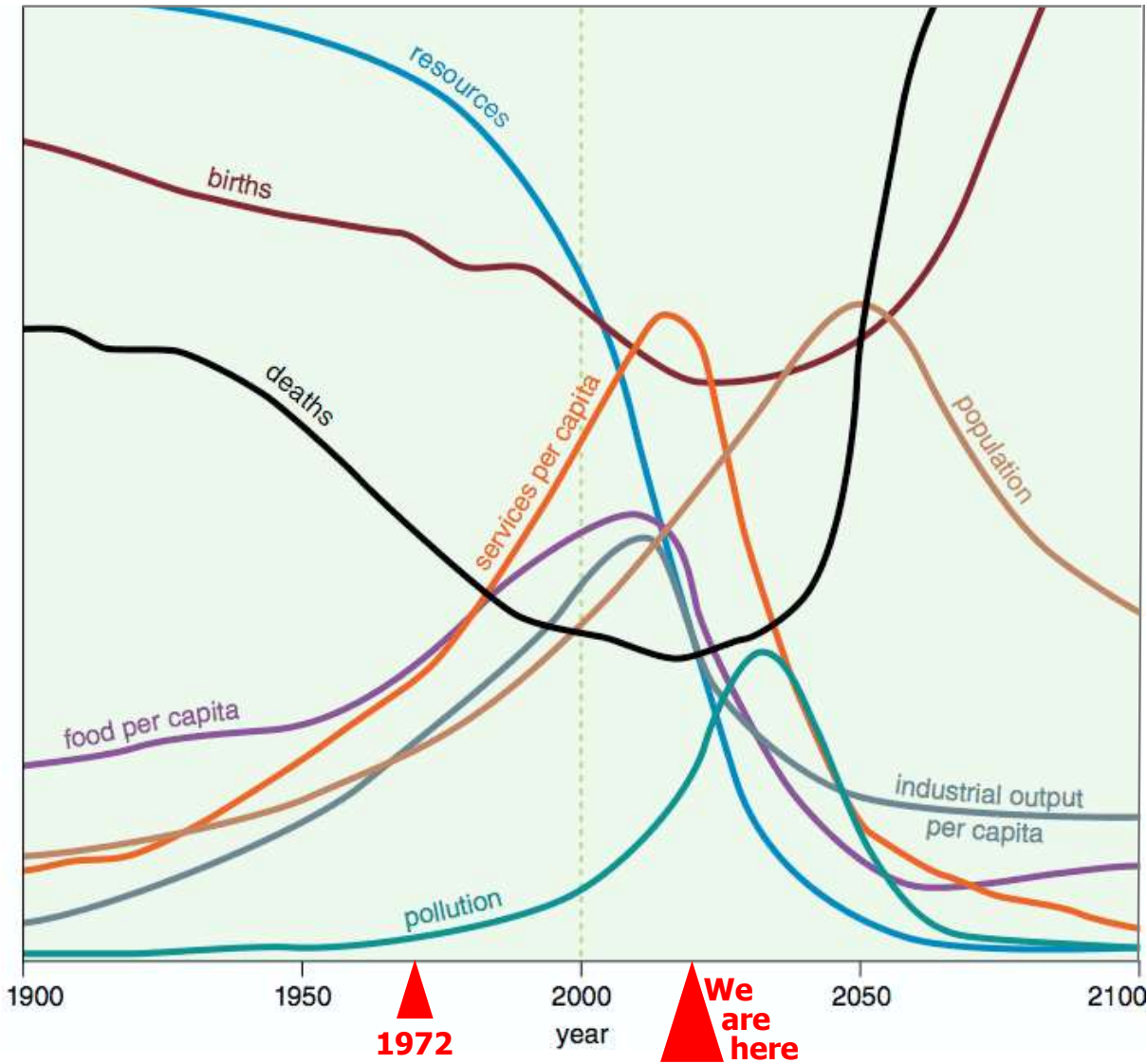
# Der Simulationszyklus (interpretiert als Automatenmodell)

*Taktgesteuerte Berechnung von  $f$ ; Ein-/Ausgänge entkoppelt (z.B. MS-Flipflop)*

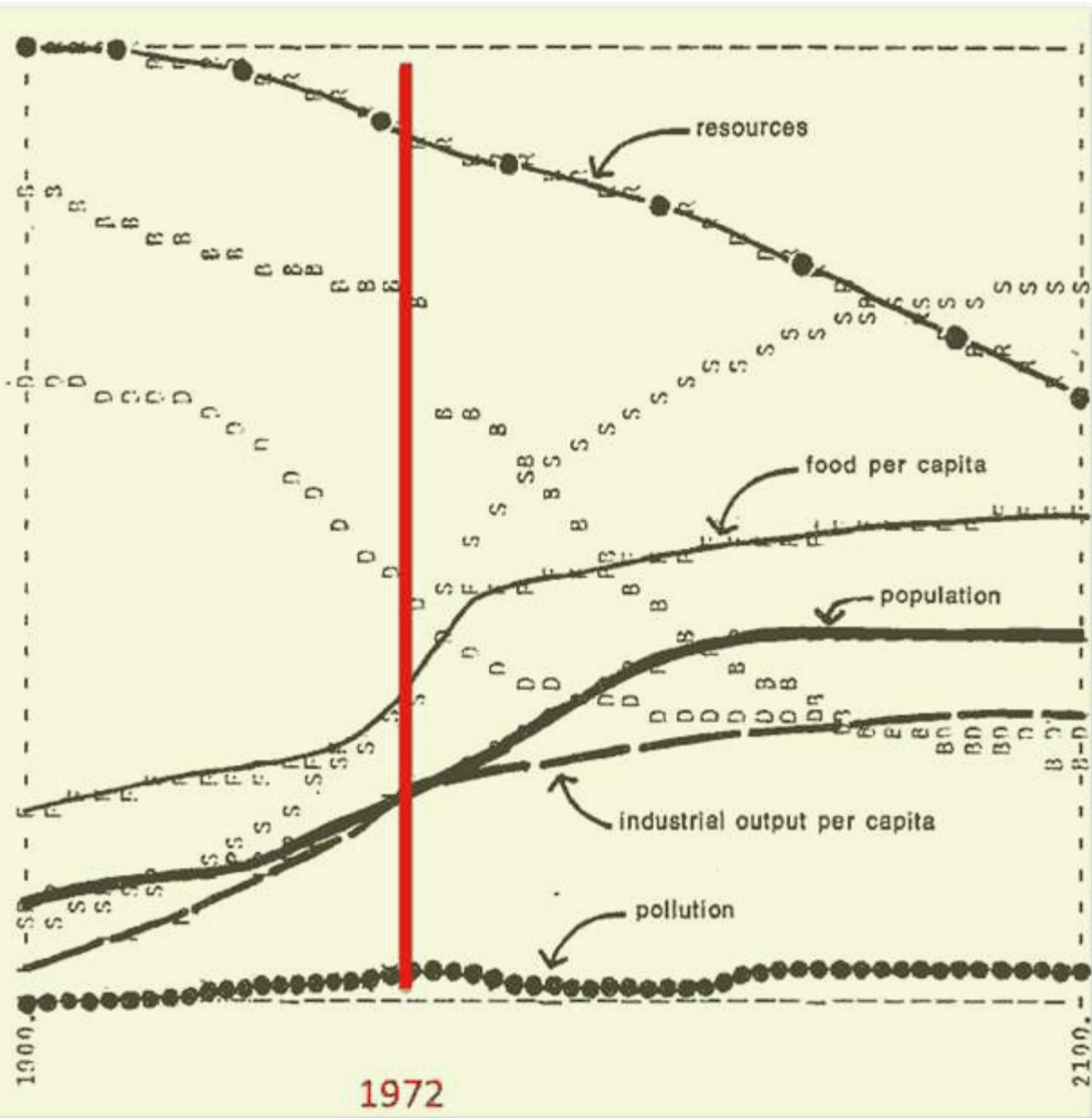


# Die Grenzen des Wachstums

Historische Notiz



Standardlauf des Weltmodells von J.W. Forrester und D. Meadows (*Die Grenzen des Wachstums*, 1972)



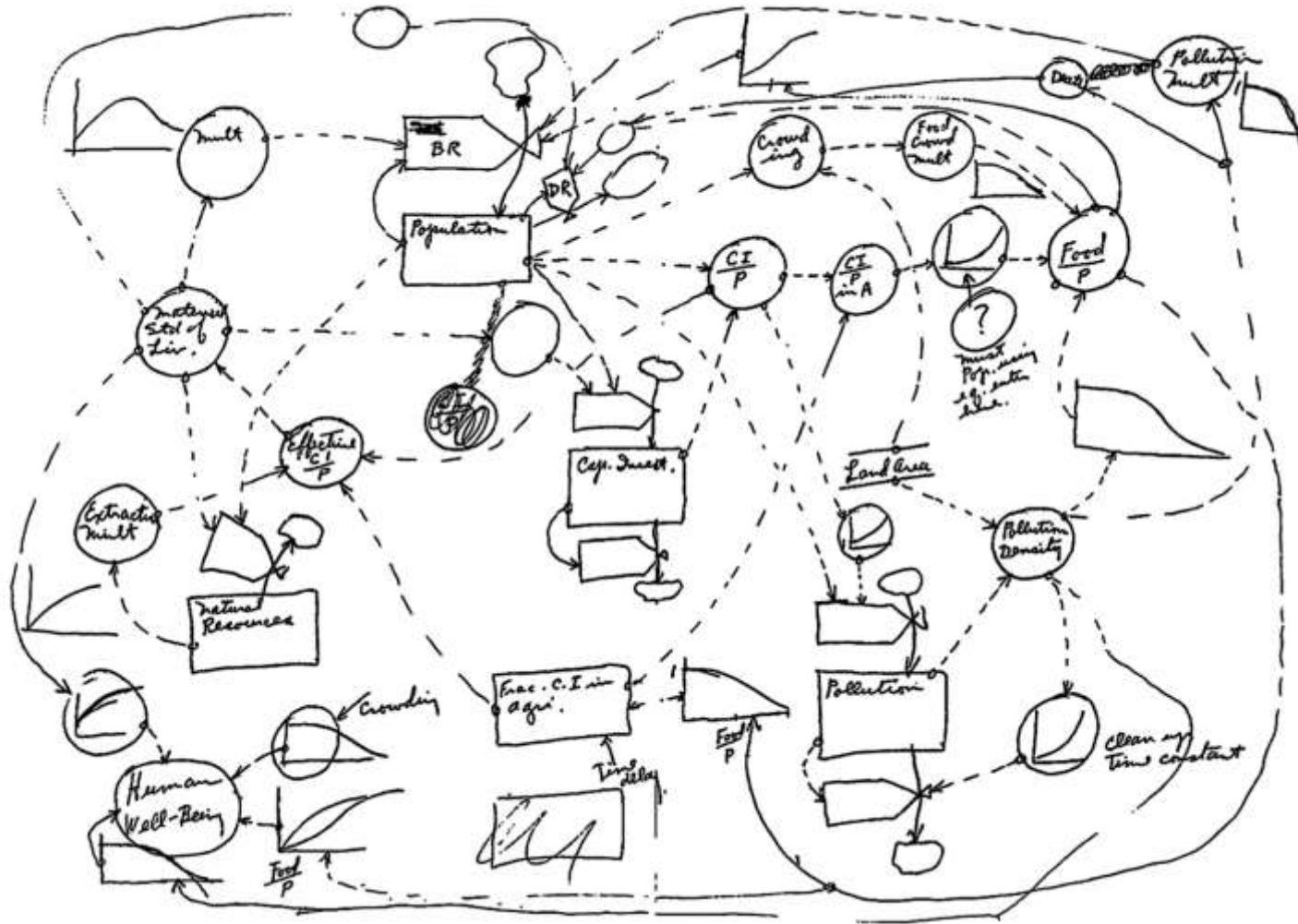
So sah in den 1970ern der „übermalte“, von einem Zeilendrucker generierte, **Computeroutput** im Original aus; hier mit der Modellannahme von **2 Kindern pro Familie** ab 1975.

„Wir erwarten nicht, dass irgendeine dieser Massnahmen, die erforderlich sind, um ein stabiles System des Modells zu erreichen, tatsächlich auf der Erde im Jahr 1975 eingeführt werden. Eine Gesellschaft, die nach Stabilität strebt, muss sich diesem Ziel schrittweise nähern. Es muss aber betont werden, dass die Möglichkeiten, Stabilität zu erreichen, immer geringer werden, je länger das exponentielle Wachstum anhält.“





# Weltmodell von Forrester / Meadows (1. Skizze)

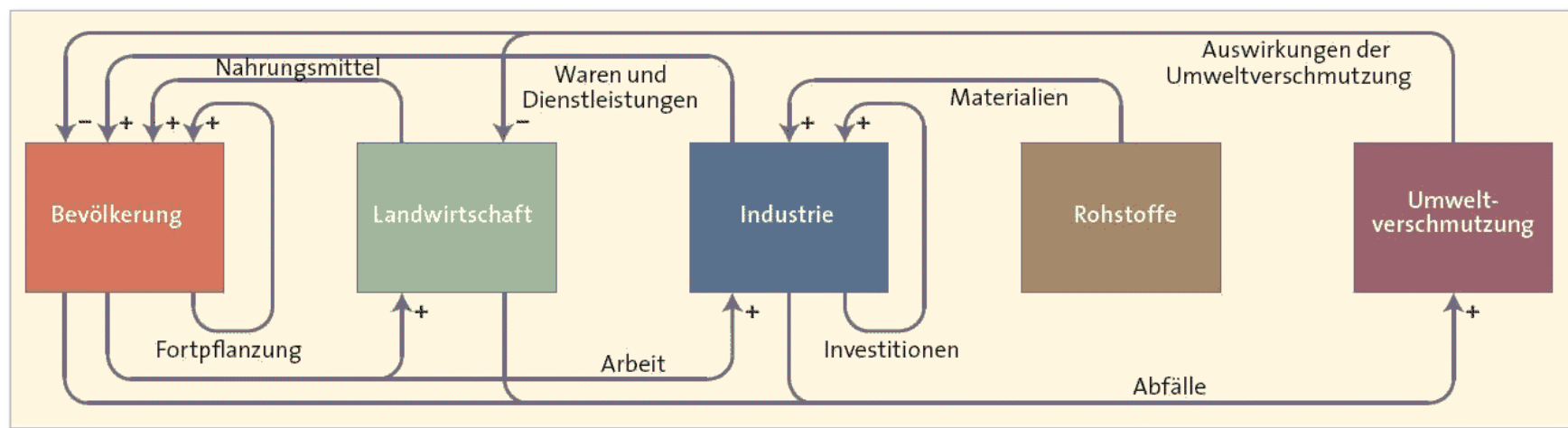


In einer ersten Hand-skizze sah das Weltmodell von Forrester damals so aus.

Quelle: Forrester Heck, Pestel (Hrsg) Der teuflische Regelkreis – das Globalmodell der Menschheitskrise, 1972

# Weltmodell von Forrester / Meadows (Globalsicht)

Das in den „Grenzen des Wachstums“ vorgestellte Modell umfasst fünf Hauptsektoren mit zahlreichen gegenseitigen Abhängigkeiten, die hier nur ausschnittsweise gezeigt sind. In den Sektoren „Bevölkerung“ und „Industrie“ gibt es selbstverstärkende Rückkopplungsschleifen, denn Menschen und Kapital pflegen sich umso stärker zu vermehren, je mehr davon schon da ist.



Quelle: Spektrum der Wissenschaft, Februar 2013, S. 77



# Weltuntergangs-Vision aus dem Computer

**Das Ende der Menschheit für spätestens das Jahr 2100 hat ein Forscher-Team vom renommierten Massachusetts Institute of Technology in einer Studie vorausgesagt.**

**Denn Bevölkerung, Nahrungsbedarf, Industrialisierung, Rohstoffverbrauch und Umweltverschmutzung treiben rapide an absolute Wachstumsgrenzen auf der Erde.**

Die Zukunftsforscher verfielen auf eine Parabel. In einem Gartenteich wächst eine Lilie, so schildern vier Wissenschaftler vom Massachusetts Institute of Technology (MIT), die jeden Tag auf die doppelte Größe wächst. Innerhalb von 30 Tagen kann die Lilie den ganzen Teich bedecken und alles andere Leben im Wasser ersticken. Aber selbst am 29. Tag denkt niemand daran, sie zurückzuschneiden; noch ist ja die Hälfte des Teiches frei. Aber schon am nächsten Tag ist kein Wasser mehr zu sehen.

Nach dem Urteil der Wissenschaftler — Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jørgen Randers und William W. Behrens III — hat für die Menschheit der 29. Tag bereits begonnen. Denn Bevölkerung, Nahrungsmittelbedarf,

Industrialisierung, Umweltverschmutzung und Ausbeutung von Rohstoffen nehmen nach dem Muster der Lilie zu, das Mathematiker als exponentielles Wachstum bezeichnen.

Wenn die Menschen sich weiterhin so vermehren wie bisher, wenn Umweltverschmutzung, Industrialisierung, Nahrungsmittelmangel und Rohstoffverbrauch so rapide steigen wie bislang, so schlußfolgert das MIT-Forscherteam in einer soeben in deutscher Übersetzung erschienenen Studie\*, „werden die absoluten Wachstumsgrenzen auf der Erde im Laufe der nächsten hundert Jahre erreicht. Mit großer Wahrscheinlichkeit führt dies zu einem ziemlich raschen und nicht aufhaltbaren Absinken der Bevölkerungszahl und der industriellen Kapazität“.

Den Menschheits-Kollaps für spätestens im Jahr 2100 ermittelten Meadows und seine insgesamt 16 Kollegen in rund 18monatiger Arbeit mit Hilfe eines Weltmodells, in dem sie Entwicklungstrends und ihre Ursachen, ihre Wechselwirkungen und die sich ergebenden Folgen für rund ein Jahrhundert mathematisch zu erfassen versuchten. Inspiriert hatte die Prognose der Club of Rome, der 1968 auf Anregung des italienischen Industriellen Aurelio Peccei von Wirtschaftlern und Wissenschaftlern verschiedener Disziplinen als Diskussionsforum gegründet worden war. Das Geld für die Studie gab die Stiftung Volkswagenwerk.

In ihrem Weltmodell rechneten die MIT-Forscher verschiedene denkbare Ereignisse der Menschheitsentwicklung durch. Im Computer simulierten sie beispielsweise Veränderungen der Geburtenrate, Sterblichkeit, Kapitalinvestitionen und Nahrungsmittelproduktion. Sie analysierten, welche Faktoren sich am ehesten ändern und wie stark und wann das geschieht.

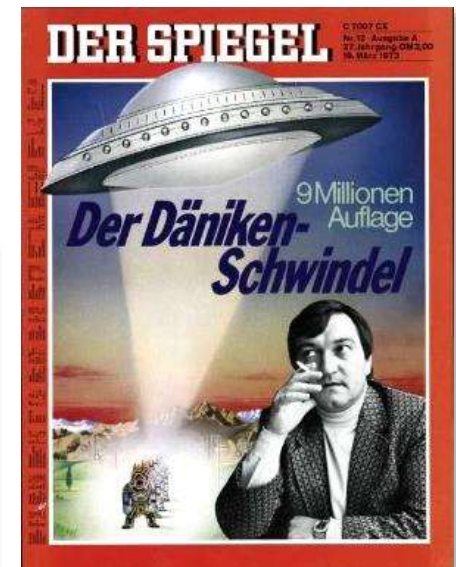
## GRENZEN DES WACHSTUMS?

Nach dem Computer-Weltmodell des Massachusetts Institutes of Technology wird die Menschheit bis zum Jahre 2100 wegen der Diskrepanz zwischen Bevölkerungswachstum und dem begrenzten Nahrungs- und Rohstoffvorrat der Erde zugrunde gehen

# Ein Computermodell als Bestseller

DER SPIEGEL, Nr. 12/1973

BELLETRISTIK		SACHBÜCHER	
<b>1</b>	<b>Bamm: Eines Menschen Zeit</b> Droemer; 25 Mark	(1)	<b>Ceram: Der erste Amerikaner</b> Rowohlt; 29,80 Mark
<b>2</b>	<b>Finck: Alter Narr – was nun?</b> Herbig; 22 Mark	(2)	<b>Ditfurth: Im Anfang war der Wasserstoff</b> Hoffmann und Campe; 29,50 Mark
<b>3</b>	<b>Kishon: Salomos Urteil zweite Instanz</b> Langen-Müller; 19,80 Mark	(3)	<b>Däniken: Aussaat und Kosmos</b> Econ; 20 Mark
<b>4</b>	<b>Herdan-Zuckmayer: Das Scheusal</b> S. Fischer; 16,80 Mark	(4)	<b>Meadows: Die Grenzen des Wachstums</b> DVA; 16,80 Mark
<b>5</b>	<b>Forsyth: Die Akte Odessa</b> Piper; 26 Mark	(8)	<b>Steinbuch: Kurskorrektur</b> Seewald; 24 Mark
<b>6</b>	<b>Böll: Gruppenbild mit Dame</b> Kiepenheuer & Witsch; 25 Mark	(5)	<b>Augstein: Jesus Menschensohn</b> C. Bertelsmann; 28 Mark
<b>7</b>	<b>Wouk: Der Feuersturm</b> Hoffmann und Campe; 34 Mark	(9)	<b>Brown: Begrabt mein Herz an der Biegung des Flusses</b> Hoffmann und Campe; 29,50 Mark



Erich von Däniken, Schweizer Autor, machte die pseudo-wissenschaftliche „Präastro-nautik“ einem breiten Lesepublikum bekannt. [Wikipedia]

Über [Karl Steinbuch](#), einer der Informatik-Pioniere in Deutschland sowie früher Protagonist des maschinellen Lernens, wurde schon an anderer Stelle etwas gesagt. Sein zweiter Bestseller (nach „Falsch programmiert“) ist allerdings eine rein politische Schrift, in der Steinbuch, der damals politisch zunehmend nach rechts tendierte, die seinerzeitige Ideologie der politischen Linken angreift.

# Vom Wachstum zum Gleichgewicht?

Die [Konsequenzen der Studie](#) werden im Einleitungskapitel so zusammengefasst:

1. Wenn die gegenwärtige Zunahme der Weltbevölkerung, der Industrialisierung, der Umweltverschmutzung, der Nahrungsmittelproduktion und der Ausbeutung von natürlichen Rohstoffen unverändert anhält, werden die absoluten Wachstumsgrenzen auf der Erde im Laufe der nächsten Jahrhunderte erreicht. Mit grosser Wahrscheinlichkeit führt dies zu einem ziemlich raschen und anhaltbaren Absinken der Bevölkerungszahl und der industriellen Kapazität.
2. Es erscheint möglich, die Wachstumstendenzen zu ändern und einen ökologischen und wirtschaftlichen Gleichgewichtszustand herbeizuführen, der auch in weiterer Zukunft aufrechterhalten werden kann. Er könnte sogar so erreicht werden, dass die materiellen Lebensgrundlagen für jeden Menschen auf der Erde sichergestellt sind und noch immer Spielraum bleibt, individuelle menschliche Fähigkeiten zu nutzen und persönliche Ziele zu erreichen.
3. Je eher die Menschheit sich entschliesst, diesen Gleichgewichtszustand herzustellen, und je rascher sie damit beginnt, um so grösser sind die Chancen, dass sie ihn auch erreicht.

Es schliesst mit der Hoffnung, dass die „riesige Aufgabe“, der Übergang vom Wachstum zum Gleichgewicht, gelingen möge.

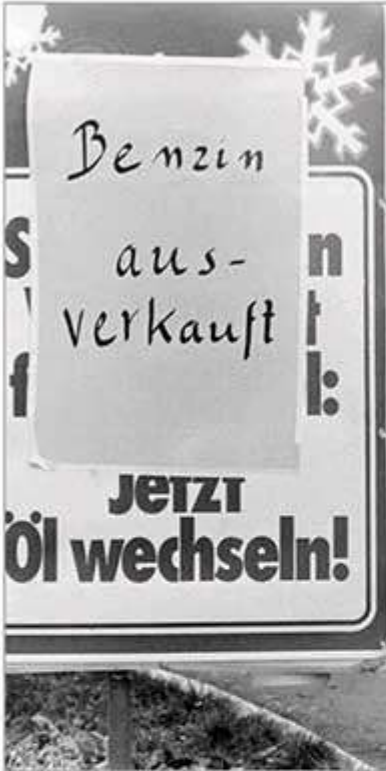


# Koinzidenz mit der ersten Ölkrise 1973

Einen **Vorgeschmack auf Wachstumsgrenzen** gab es bereits ein Jahr später

Die Ölverknappung war allerdings eher politisch motiviert; schon nach einigen Wochen floss Öl wieder in ausreichendem Masse – wenn auch deutlich teurer











# Grenzen des Wachstums: Die Anfänge

“When *The Limits to Growth* hit the World in 1972, Dennis and Donella Meadows – then married, later amicably divorced – were hotshot academics still in their early 30s. They had spent the last two years working on computer-based models of dynamic systems. The project was, at first, just something fascinating to do. ‘We didn’t even think about trying to change the world,’ said Donella. ‘We were just trying to make a good computer model.’

After they had presented their preliminary technical results to a range of audiences, from fellow scientists to United Nations bureaucrats, and received mixed reviews, Donella had a realization. ‘There needed to be a little popular book that communicated the central idea in a way that the average reader could understand, without all the computerese and scientific jargon. And the central message was about growth and limits.’ She set to work on the ‘popular’ book, and fought unsuccessfully with her colleagues and co-authors to keep the computer model totally out of it. In the end, it was the *inclusion* of the computer model that most captured the public imagination, and that – combined with the chilling message about the possible fate of humanity – propelled the book to the bestseller list.

The leak of an early manuscript to Time magazine, which immediately published a grim, doomsday article about their research, underscored the fact that they had a tiger by the tail: ‘It was out of our hands at that point, it was something bigger than we could control.’

*The Limits to Growth* was an international phenomenon. Donella and Dennis began to believe that the World could indeed be changed. ‘We were received politely wherever we went’, recalls Donella. ‘It lasted about two weeks. Then the big guns came out.’ The ‘big guns’ were a small army of prominent economists, scientists and political figures who took aim at Limits from all sides. They attacked the methodology, the computer, the conclusions, the rhetoric and the people behind the project.”

[Excerpts from Alan Atkisson: *Believing Cassandra: How to be an Optimist in a Pessimist's World*, 1999. ]

# Grenzen des Wachstums: Kritik und Rezeption

Das Buch erlangte bei seinem Erscheinen 1972 sehr schnell eine hohe mediale Aufmerksamkeit. Dies lag sicherlich einerseits an den apokalyptisch anmutenden Aussagen, andererseits aber auch am Mythos Computer, dem als Elektronengehirn oft noch eine Art Unfehlbarkeit unterstellt wurde. Zumindest galt in der Öffentlichkeit der „Grosscomputer“ als Garant wissenschaftlich fundierter Thesen und als Instrument so präziser Berechnungen, dass auf deren Grundlagen sogar Mondlandungen möglich waren. Auch die aus heutiger Sicht eher primitiv anmutenden „Computergraphiken“ in Form von Kurvenlinien aus einzelnen Buchstaben, die auf einem Zeilendrucker „automatisch“ ausgedruckt wurden, flössten Ehrfurcht ein. Die „Frankfurter Rundschau“ betitelte ihren Artikel über das Buch etwa mit „Düsterer Zukunftsbericht aus dem Computer“.

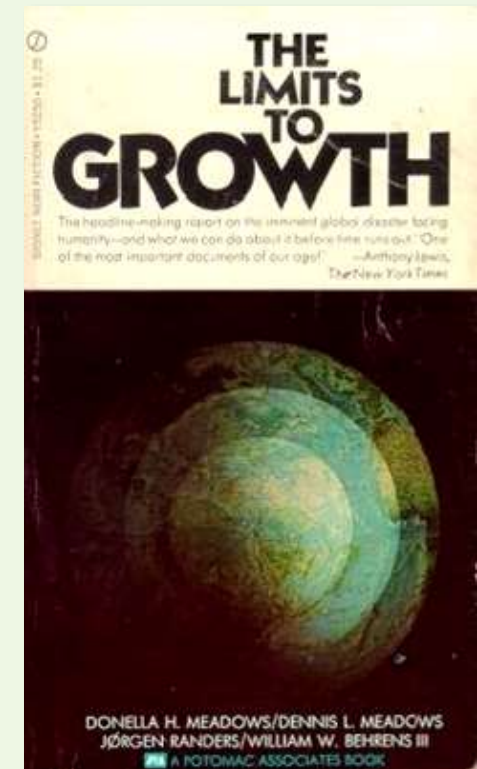
Von Seiten der Wissenschaft kam neben einiger Anerkennung allerdings auch Tadel. Kritisiert wurde etwa die eher geringe Zahl von Variablen des Weltmodells, aber auch, dass bis dato noch unentdeckte Rohstoffquellen nicht berücksichtigt wurden, genauso wenig wie der zu erwartende generelle technische Fortschritt. Weitere Kritikpunkte waren die unsichere Datenbasis und die rein technokratische Behandlung des Wachstumsaspektes und seiner Folgen, der soziale und politische Faktoren ausser Acht lassen würde. Insbesondere von wirtschaftswissenschaftlicher Seite wurden die Aussagen der Studie heftig kritisiert. Der „Economist“ charakterisierte die Studie als “the high-water mark of old-fashioned nonsense”, und der bekannte Oxford-Ökonom Wilfred Beckerman brandmarkte sie gar als “a brazen, impudent piece of nonsense by a team of whizz-kids from MIT.”

Politik und etablierte Parteien taten sich etwas schwer mit den Grenzen des Wachstums. Es herrschte weitgehend ein gesellschaftlicher Konsens, dass Wohlstandssteigerung sowohl in der entwickelten Welt wie in den Entwicklungsländern nur durch Wirtschaftswachstum zu erzielen sei und eine Gleichgewichtsgesellschaft daher nicht anzustreben sei. Soziale Gerechtigkeit, aber etwa auch die zu steigernden Anstrengungen für den Umweltschutz, benötigten das Wachstum. So blieb es den Umwelt- und „grünen“ Politikgruppen vorbehalten, darauf aufbauend einige Jahre später ein politisches Programm zu entwickeln und sich als neue politische Kraft zu etablieren.

## Rückblick 2007:

„Mit ‚Die Grenzen des Wachstums‘ legte der Club of Rome 1972 die heilige Schrift aller Zukunftsskeptiker vor. Die Computersimulation in Buchform war der erste Öko-Megaseller überhaupt und prägte das gesellschaftliche Klima der Siebziger wie kein anderes Werk. [...] Eine Publikation mit 160 Seiten und 48 Kurvendiagrammen, die zum erfolgreichsten und einflussreichsten Umwelt-Buch nach der biblischen Schöpfungsgeschichte wurde. [...] Die Hochrechnungen des MIT reichen von 1900 bis 2100 und untersuchen das Auf und Ab von fünf Werten: Erdbevölkerung, Industrieproduktion, Nahrungsversorgung, Rohstoffvorräte und Umweltverschmutzung. Aus vielen Einzelstudien schält sich eine Erkenntnis heraus: Nur wenn Pro-Kopf-Produktion und Bevölkerungszahl konstant bleiben und der Ressourcenverbrauch auf ein Viertel schrumpft, kann die Menschheit der Katastrophe entgehen. In allen anderen Fällen drohen im 21. Jahrhundert globale Hungersnöte und der Zusammenbruch der Industriekapazität. [...] Am 2. März 1972 erscheint in den USA ‚The Limits to Growth‘, die 160 Seiten starke Vorabversion des Projektberichts. Die deutsche Fassung ‚Die Grenzen des Wachstums‘, die zwei Monate nach der amerikanischen herauskommt, wird ein Bestseller. Die Botschaft vom ‚Nullwachstum‘ verbreitet sich rasant, und im Oktober 1973 erhält der Club of Rome den Friedenspreis des deutschen Buchhandels. [...] Weltweit wird ‚The Limits to Growth‘ in 37 Sprachen übersetzt und mehr als 12 Millionen mal verkauft. Zum einen trifft das Werk den Zeitgeist: [...] im Juni 1972 tagte in Stockholm die erste Umweltkonferenz der Vereinten Nationen. Zum anderen verknüpfte es den Mythos vom allwissenden Computer mit der Aura des Zirkels weiser Männer, als den man den Club of Rome wahrnimmt.“

*(Ralf Bülow: Apokalypse aus dem Computer, einestages.spiegel.de)*





## Rückblick 2008:

„Warten wir nicht seit 30 Jahren, bequem in den Fernsehsessel gelümmelt, auf die Katastrophe? Seit 1972 sagen der Wissenschaftler Dennis Meadows und seine Kollegen Schlimmstes vorher. Dabei ist das Bier hierzulande immer noch schön kühl, und die Erde dreht sich...

Damals stürmte die These vom nahen, selbstverschuldeten Untergang der Menschheit die Bestsellerlisten... Zum ersten Mal hatten Autoren den Mut und die argumentative Stärke, um mit Vehemenz auf die Endlichkeit der Erde aufmerksam zu machen. Und das zeigte glücklicherweise Wirkung: Sie verstärkten die Aufbruchsstimmung der 1980er Jahre, in denen sich die Grünen gründeten. Sie bereiteten den Boden für den internationalen Umweltschutz. Und sie brachten die Ökonomen dazu, über Wirtschaften ohne Wachstum nachzusinnen.“

Petra Pinzler in „Die Zeit“ Nr. 19 vom 30. April 2008



# Süddeutsche Zeitung

## Viel erforscht, wenig erreicht

5. November 2018

Von Silvia Liebrich

Bereits vor 50 Jahren warnte der Club of Rome vor den Grenzen des Wachstums und forderte einen Wandel der Wirtschaft. Damals wurden die Prognosen als Unsinn abgetan. Heute ist klar: Das war ein Fehler.

Automanager mit erklärtem Hang zum Umwelt- und Klimaschutz sind heute eine äußerst rare Spezies. Kaum vorstellbar, dass etwa VW-Chef Herbert Diess oder BMW-Top-Mann Harald Krüger eine Organisation gründen, die einen grundlegenden Wandel der Weltwirtschaft fordert. Dennoch ist vor genau 50 Jahren dieser unwahrscheinliche Fall eingetreten. Damals ließ der italienische Automanager Aurelio Peccei 30 anerkannte Wissenschaftler nach Rom einfliegen, auf Rechnung der Fiat-Dynastie Agnelli. Ihr Arbeitsauftrag lautete ein zukunftsträchtiges „Modell der Welt“ zu entwerfen.

Der Zirkel von Visionären gab sich den Namen Club of Rome und erreichte wenige Jahre später mit seinem Bericht „Die Grenzen des Wachstums“ fast über Nacht weltweite Bekanntheit. Finanziell gefördert wurde er damals auch von der Volkswagenstiftung. Das 1972 erschienene Buch dazu verkaufte sich millionenfach. Die Analyse „zur Lage der Menschheit“ markierte zugleich den Beginn einer kritischen Zukunfts- und Umweltforschung. [...]

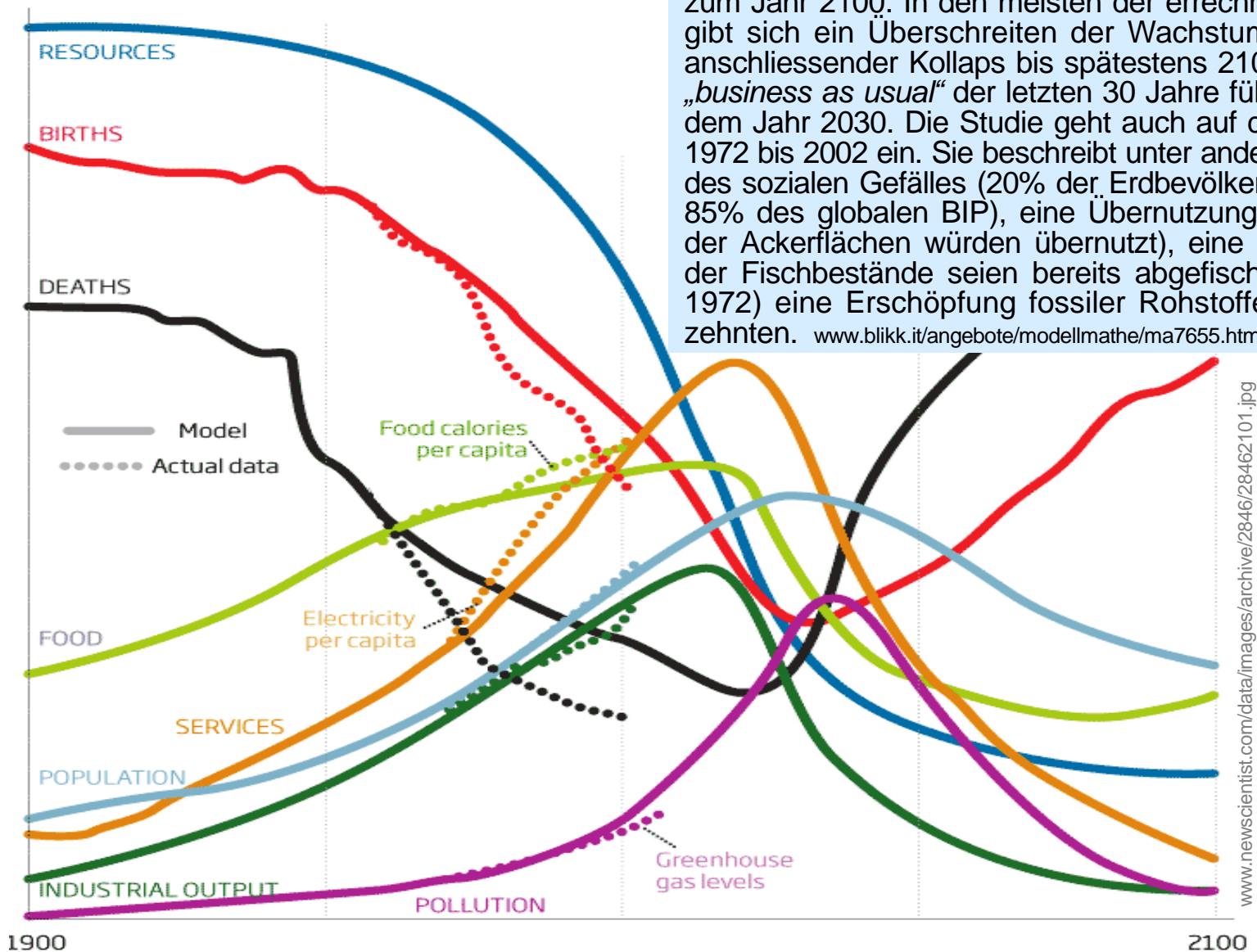
Tatsächlich war die Warnung unmissverständlich: „Wenn die gegenwärtige Zunahme der Weltbevölkerung, der Industrialisierung, der Umweltverschmutzung, der Nahrungsmittelproduktion und der Ausbeutung von natürlichen Rohstoffen unverändert anhält, werden die absoluten Wachstumsgrenzen auf der Erde im Laufe der nächsten hundert Jahre erreicht“, heißt es in dem Bericht von 1972.

Eine Prognose, die sich inzwischen in den wesentlichen Punkten bewahrheitet hat, auch wenn Kritik an einzelnen Punkten der Analyse berechtigt war. So wurden etwa der technologische Fortschritt und eine effizientere Ressourcennutzung unterschätzt, auch gingen die Experten davon aus, dass keine nennenswerten Rohstoffvorkommen mehr entdeckt werden. Fehler wie diese wurden in folgenden Berichten korrigiert. [...]

„Die meisten der ursprünglichen Schlussfolgerungen gelten noch immer“, sagt der schwedische Resilienzforscher Johan Rockström, einer der Hauptautoren des neuen Berichts und Leiter des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung. „Das ist zwar befriedigend für die Wissenschaft, nicht aber für die Gesellschaft“.

# Aktualisierung 2004

Einen **30-Jahre-Update** veröffentlichten die Autoren im Jahr 2004. Darin brachten sie die verwendeten Daten auf den neuesten Stand, nahmen leichte Veränderungen an ihrem Computermodell vor und errechneten anhand verschiedener Szenarien mögliche Entwicklungen ausgehend vom Jahr 2002 bis zum Jahr 2100. In den meisten der errechneten Szenarien ergibt sich ein Überschreiten der Wachstumsgrenzen und ein anschließender Kollaps bis spätestens 2100. Fortführung des „*business as usual*“ der letzten 30 Jahre führe zum Kollaps ab dem Jahr 2030. Die Studie geht auch auf die Entwicklung von 1972 bis 2002 ein. Sie beschreibt unter anderem eine Zunahme des sozialen Gefälles (20% der Erdbevölkerung verfügten über 85% des globalen BIP), eine Übernutzung des Bodens (40% der Ackerflächen würden übernutzt), eine Überfischung (75% der Fischbestände seien bereits abgefischt) und (wie bereits 1972) eine Erschöpfung fossiler Rohstoffe in wenigen Jahrzehnten. [www.blick.it/angebote/modellmathe/ma7655.htm](http://www.blick.it/angebote/modellmathe/ma7655.htm)





# Aktualisierung nach 40 Jahren (2012)

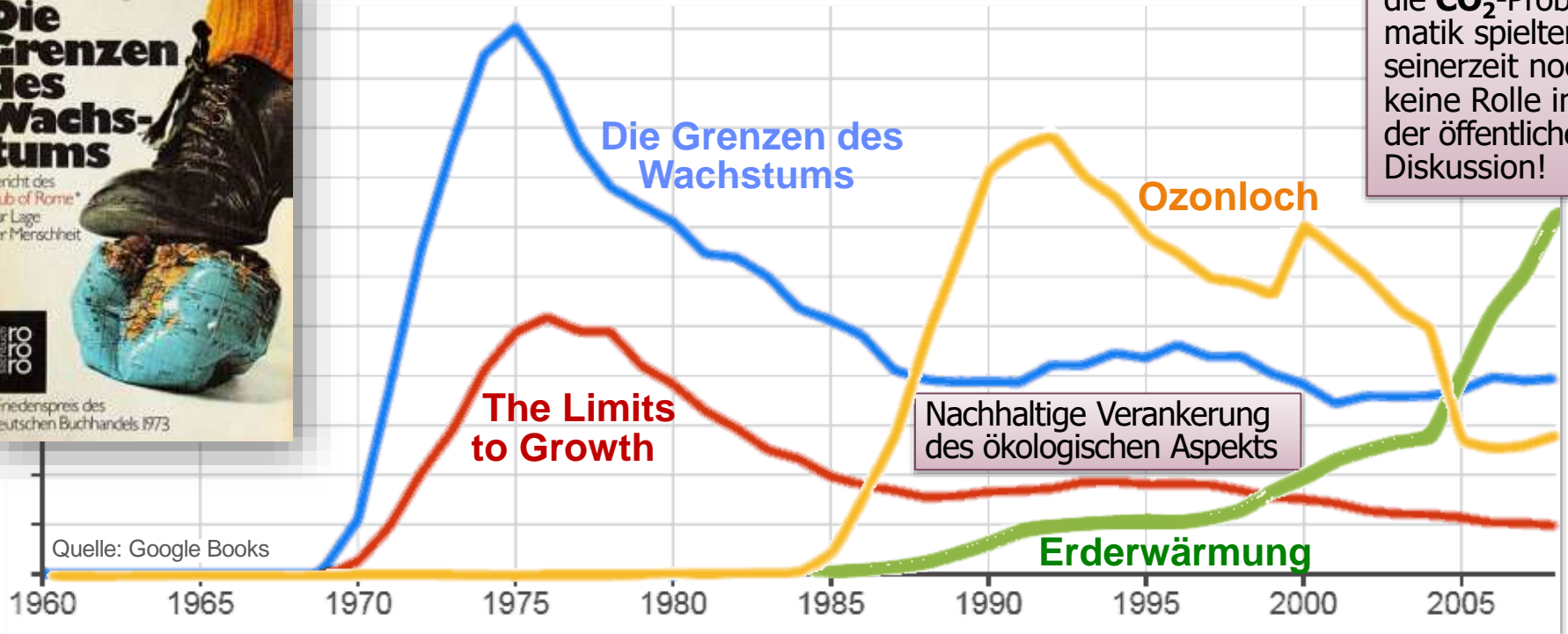


Nach mehreren Zwischenberichten des Club of Rome liegt seit 2012 das von Jørgen Randers verfasste Buch „2052. Eine globale Prognose für die nächsten 40 Jahre“ (im Original: „2052. A Global Forecast for the Next Forty Years“) als der neue Bericht an den Club of Rome vor – 40 Jahre nach „Die Grenzen des Wachstums“.

Nach Randers, welcher bereits bei der ersten Publikation von 1972 unter den Autoren war, werde sich das Bevölkerungswachstum verlangsamen, ab etwa 2040 werde die Bevölkerung schrumpfen. Die Erwerbsbevölkerung werde bereits um 2030 abnehmen. Produktivität sowie Bruttoinlandsprodukt würden weiter wachsen, jedoch langsamer. Die Temperatur werde um mehr als zwei Grad steigen, und das werde zu ernsthaften Problemen führen. Die Welt müsse lernen, mit geringerem Wirtschaftswachstum als heute üblich zu leben – dies gelänge uns nur, wenn wir auch lernten, wie man ohne Wachstum umverteilt.

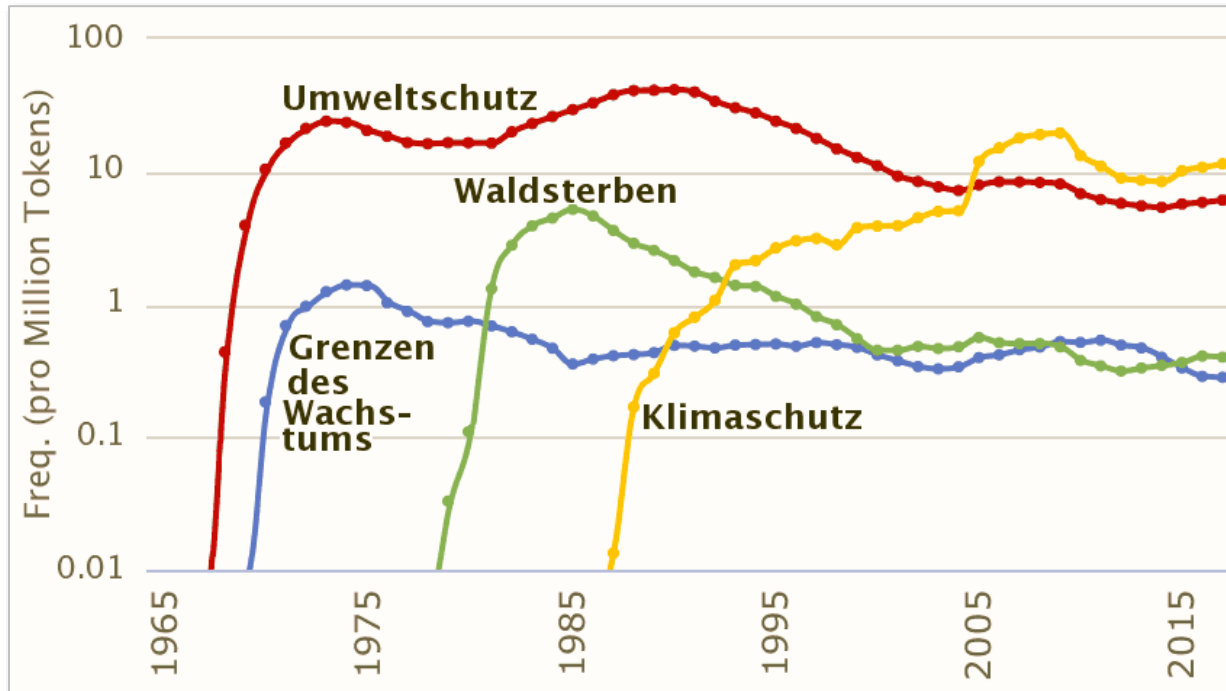


# Grenzen des Wachstums: Bewusstseinsprägend?



Es gibt nur wenige Bücher, die die Welt bewegen. Dieses gehört zweifelsfrei dazu, schärfte es doch das Bewusstsein für die Endlichkeit natürlicher Ressourcen und trug dazu bei, Ökologie als Argument ernster zu nehmen als zuvor. Aber auch wenn der Buchtitel zu einem geflügelten Wort aufstieg, zündete die „Bombe im Taschenbuchformat“ letztlich nicht – dass „Die Grenzen des Wachstums“ die Welt nachhaltig verändert hätten, bezweifelt angesichts der erneuten Wachstumseuphorie seit den 1990er-Jahren nicht nur Dennis Meadows. [Nils Freytag, „Eine Bombe im Taschenbuchformat“? (2006), H. 3, [www.zeithistorische-forschungen.de/3-2006/id=4478](http://www.zeithistorische-forschungen.de/3-2006/id=4478)]

# Grenzen des Wachstums: Bewusstseinsprägend?



Einige relevante Begriffe aus dem DWDS-Zeitungs-korpus; man beachte, dass die y-Achse hier logarithmisch skaliert ist! Man sieht: **Umweltschutz** war gerade schon ein heisses Thema, als das Buch herauskam; bis aber der **Klimaschutz** auf der journalistischen Agenda erschien, dauerte es 20 weitere Jahre – und nochmal 15, bis er (oder der analoge Begriff „Klimawandel“) schliesslich grössere Bedeutung gewann.

Environmental historians have conceived of the time around 1970 as the 'threshold' period of environmentalism [...]. The late 1960s and early 1970s saw the emergence of an environmental movement in the Western world that called for an immediate and radical assessment and immediate cutback of the hitherto industrial and economical mode of the so-called developed world. [...] The 'years of decision' around 1970 have been portrayed as a historical turning point, an 'environmental revolution'. [...] 1972 was the year in which the UN Conference on the Human Environment in Stockholm took place and in which upsetting studies such as *The Limits to Growth* and the *Blueprint for Survival* were published. [...] The years 1973 and 1974 are often underlined for the oil price shock, which is said to have put an end to the 'age of ecological innocence'. [Sabine Höhler: *Spaceship Earth in the Environmental Age, 1960-1990.*]



# Grenzen des Wachstums: Die Autoren

*Dennis Meadows* referiert *an der ETH Zürich*: 2005 (rechts) und 1973 noch sichtlich jünger (unten, mit 30 Jahren) neben *ETH-Professor Werner Stumm* (1924 – 1999), Direktor der Eidgen. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (Eawag)



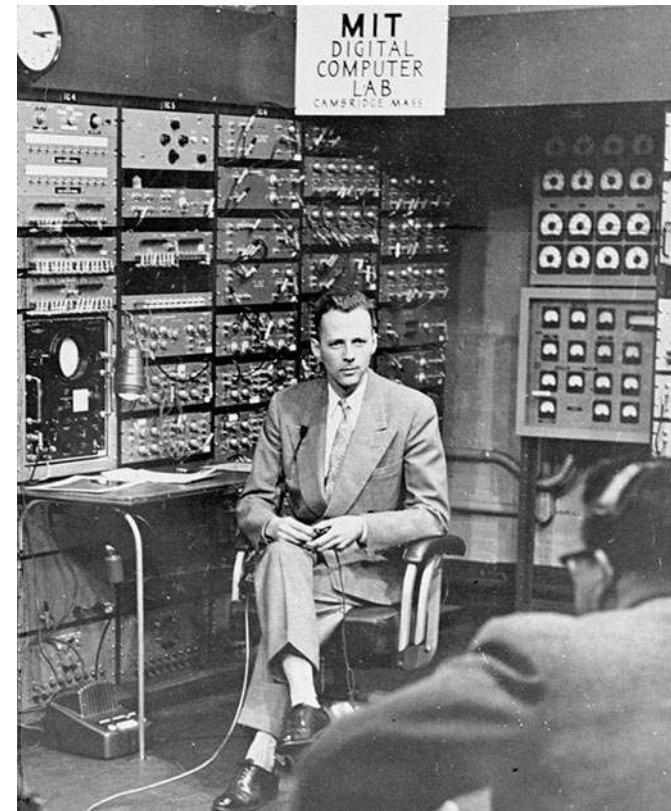
Meadows (Jg. 1942) ist ein US-amerikanischer Systemtheoretiker mit natur-, sozial- und ingenieurwissenschaftlichem Hintergrund. Bachelorstudium der Chemie, Managementstudium und Promotion am MIT. Em. Professor am MIT und ehem. Leiter d. Institute for Policy and Social Science Research an der Univ. of New Hampshire.

# Grenzen des Wachstums: Die Autoren (2)

Ein Erfolg hat bekanntlich oft viele Väter – hier spielen aber auch Mütter eine Rolle. Das amerikanische Original, „The Limits to Growth“ von 1972, nennt vier Autoren: [Donella H. Meadows](#), [Dennis L. Meadows](#), [Jørgen Randers](#) und [William W. Behrens III](#). Die erste deutsche Ausgabe von 1972 (DVA, Deutsche Verlags Anstalt) führt hingegen nur Dennis Meadows auf. Ein Jahr später erschien eine deutsche Taschenbuchausgabe bei rororo mit einem schockierenden Umschlagbild – ein Schnürschuh mit gelbem Grobstrickstrumpf im Schaft zertritt den Erdglobus – und nun werden zwar auch vier Autoren aufgeführt, als erster Dennis Meadows in roter Schrift, gefolgt von seiner damaligen Ehefrau Donella Meadows, aber als weitere Autoren werden jetzt die Deutschen [Erich Zahn](#) und [Peter Milling](#) genannt.

Tatsächlich wurde das Buch von einem interdisziplinären Team am Massachusetts Institute of Technology (MIT) produziert, welches von Dennis Meadows als Direktor geleitet wurde, und u.a. alle oben aufgeführten Personen umfasste. Dabei spielte [Donella Meadows](#) (1941 – 2001) eine herausragende Rolle. Sie war Mitarbeiterin von [Jay Forrester](#) (1918 – 2016), der früher das Whirlwind-Computerprojekt am MIT geleitet hatte, den gefädelten Magnetkernspeicher erfand und später mit der Systemdynamik diejenige Simulationsmethodik konzipiert hatte, auf der das „World3“-Simulationsmodell beruhte, das die Grundlage von „The Limits to Growth“ bildete.

*Jay Forrester vor dem Whirlwind-Computer im MIT Digital Computer Lab, 1957*





# Grenzen des Wachstums: Die Autoren (3)

Donella Meadows kam 1992 eine besondere Ehre zu – sie war die erste Frau, die **Ehrendoktorin der ETH Zürich** wurde. Beim 137. ETH-Tag wurde die Urkunde verlesen: *Die Eidgenössische Technische Hochschule Zürich verleiht mit dieser Urkunde Frau Prof. Dr. Donella H. Meadows*



*in Würdigung ihrer grossen wissenschaftlichen Leistungen bei der Entwicklung eines Weltmodells ökologischer Zusammenhänge und in Anerkennung ihres ausserordentlichen Einsatzes bei der Umsetzung wissenschaftlicher Erkenntnisse in Einsicht und adäquates Handeln die Würde eines Doktors der Technischen Wissenschaften ehrenhalber.*



Fotoshooting für das Gruppenbild mit Dame: **Donella Meadows** in der ersten Reihe zwischen Rektor Hans von Gunten (links) und dem zweiten ETH-Ehrendoktor von 1992, **Ernst Basler** (rechts). [Fotos: Bildarchiv ETH-Bibliothek via [blogs.ethz.ch/digital-collections](https://blogs.ethz.ch/digital-collections)]



# Grenzen des Wachstums: Die Autoren (4)

1992 war das Ehepaar Meadows schon mehrere Jahre lang geschieden. Donella Meadows merkte dazu 1987 an: "We live together amicably [...]. We thought we'd start a new trend called living together after marriage." Es war jedenfalls bemerkenswert, dass sie und nicht etwa Dennis Meadows, der Direktor des „Club of Rome Project on Predicament of Mankind“ am MIT, oder beide Personen zusammen, von der ETH geehrt wurden. Yvonne Voegeli, Mitarbeiterin der ETH-Bibliothek im Bereich wissenschaftshistorischer Sammlungen, schrieb dazu:

„Die Wahl fiel wahrscheinlich weder zufällig, noch kurzfristig auf Donella Meadows. Denn wer hätte sich auf der Forschungsseite besser als Vorbild geeignet für die frisch zu Diplomierenden und die künftigen Studierenden, insbesondere für die noch wenigen weiblichen unter ihnen, als die Universitätsprofessorin aus dem Club of Rome? Donella Meadows war trotz der damaligen gesellschafts- und wissenschaftspolitischen Situation keineswegs eine Alibi-Frau, die nur wegen des Zeitgeists geehrt wurde, ohne wirkliche Verdienste vorweisen zu können. Im Gegenteil: Sie hatte massgeblich das Computermodell mitentwickelt, das den Zukunftssimulationen des Club of Rome zugrunde lag. Zudem verfasste sie die Texte der



Ca. 1970, von links nach rechts: Jay Forrester, Donella Meadows, Dennis Meadows

# Grenzen des Wachstums: Die Autoren (5)

verschiedenen Team-Beiträge in einer allgemein verständlichen Sprache, was wesentlich zur Verbreitung der Ergebnisse in der Öffentlichkeit weit über die akademischen Zirkel hinaus beitrug.“

Im Zürcher Tages-Anzeiger berichtete die Journalistin Barbara Vonarburg am 24. November 1992 aus Anlass der Verleihung der Ehrendoktorwürde in einem längeren Artikel über Donella Meadows und ihre Arbeit. Darin heisst es u.a.: *Findet sie es nicht frustrierend, im Schatten ihres Ex-Mannes zu stehen? Nein, meint sie, das kümmere sie wenig. „Ich bin ziemlich schüchtern und liebe es nicht, im Brennpunkt zu sein.“ Sie versuche aber doch, ihre Rolle bei der Arbeit korrekt darzustellen, dies im Interesse von anderen Frauen. Dass bei der deutschen Ausgabe des ersten Buches nur Dennis‘ Name auf dem Umschlag stand, hätte sie nicht erlaubt, wenn sie davon gewusst hätte. Und am Ehrendokortitel der ETH, den sie vergangenen Samstag erhalten hat, freut sie besonders, dass damit erstmals eine Frau ausgezeichnet worden ist.“*



Donella Meadows, 1941 – 2001

Udo E. Simonis schrieb zu Donella Meadows: Dana, wie ihre Freunde sie liebevoll nannten, war eine führende Stimme im globalen Nachhaltigkeitsdiskurs. Und sie wurde gehört – mit ihren anderen Büchern, aber auch und besonders durch ihre wöchentliche Kolumne „The Global Citizen“, die seit 1985 regelmäßig erschien, vielfach abgedruckt wurde und mehrere Preise erhielt. Dana war eine vielseitige lokale Aktivistin mit globaler Perspektive: 27 Jahre lang hat sie einen organischen Bauernhof geführt, ein Ökodorf und das „Sustainability Institute“ gegründet. Ihre Mutter nannte sie eine „Earth missionary“, eine Erd-Missionarin. Sie selbst beschrieb sich einmal als „engagierte Kolumnistin, ewige Spendeneintreiberin, leidenschaftliche Gärtnerin, Opernliebhaberin, Bäckerin und Bäuerin, Lehrerin und weltweit emsige Stechfliege“.

# Ernst Basler – Raumschiff Erde



Zusammen mit Donella Meadows erhielt 1992 auch der Schweizer Bauingenieur und Unternehmer **Ernst Basler** die Ehrendoktorwürde der ETH Zürich. Basler war ebenfalls ein Pionier des ökologischen Nachhaltigkeitsdenkens und nahm teilweise Erkenntnisse des Club of Rome in Vorlesungen und Veröffentlichungen vorweg. In seinen Vorträgen übernahm Basler den bildhaften Begriff vom „Raumschiff Erde“ – von der britischen Ökonomin und Ökologin Barbara Ward (1914 – 1981) durch ihr Buch „Spaceship Earth“ 1966 populär gemacht und Ende der 1960er-Jahre durch die Fotos der Apollo-Raumflugmissionen von der weit entfernten Erde in Szene gesetzt. In einem Referat im November 1970 an der ETH Zürich vertrat er die These, die Menschheit müsse dazu kommen, einzusehen, dass sie auf einem Raumschiff lebe, mit beschränkten Ressourcen an Energie, Sauerstoff etc. und mit einem biologischen Haushalt, der nicht ungestraft gestört werden darf. Überleben bedeute somit „raumschiffgerecht leben und wirtschaften“. Anlässlich der Vorstellung des Buches „Endliche Erden“ zu seinem Leben und Schaffen erschien Anfang 2018 ein Interview im Blog seiner Firma; hier einige Auszüge:

**Frage:** Was hat Sie Anfang der 1970er-Jahren dazu gebracht, öffentlich vor den negativen Folgen eines weiteren ungebremsten Wachstums zu warnen?

**Ernst Basler:** Für mich waren damals drei Erkenntnisse ausschlaggebend: Erstens, dass Bevölkerung, Wirtschaft und Konsum und damit Umweltbelastungen und Ressourcenverbrauch nicht linear mit der Zeit ansteigen, sondern exponentiell. Zweitens, dass unser Lebensraum, die Biosphäre, beschränkt ist: Sie ist nur ein hauchdünner Schleier um den Erdball und dieser ein einsames Raumschiff in der Unendlichkeit des Universums. Und drittens, dass der Mensch bereits so zahlreich und mächtig ist, dass er in der Lage ist, Prozesse von der gleichen Grössenordnung auszulösen, wie sie in der Natur vorkommen. Die Schlussfolgerung lag für mich auf der Hand: Unbeschränktes Wachstum auf beschränktem Raum führt auf die Dauer zur Zerstörung unserer Lebensgrundlagen.

**Frage:** Sie begnügten sich nicht mit der Rolle des Mahners, sondern setzten sich intensiv damit auseinander, wie die Menschheit auch auf begrenztem Raum mit endlichen Ressourcen prosperieren kann. Dafür verwendeten Sie als einer der Ersten den Begriff „Nachhaltigkeit“. Wie kamen Sie darauf?



# Ernst Basler – Nachhaltigkeit

Ende des historischen Exkurses

**Ernst Basler:** Ich stieß im Gespräch mit einem Forstingenieur zufällig auf diesen Begriff aus der Waldwirtschaft. Als er mir erklärte, was mit „nachhaltig“ gemeint ist, nämlich dass der Förster in einem Jahr nur so viel Holz schlägt, wie im gleichen Zeitraum nachwächst, wusste ich sofort: Das ist der Ausdruck, nach dem ich lange gesucht hatte, ein eingängiges deutsches Synonym für das englische „sustainable development“.

Ich war überzeugt, dass sich „Nachhaltigkeit“ als Metapher für den gesamten Umgang mit der Biosphäre eignet. Es war der Globalausdruck für einen Gleichgewichtszustand ohne übermässiges quantitatives Wachstum und ohne langfristige Übernutzung unserer Lebensgrundlagen. 1972 verwendete ich den Begriff in meinem Buch „Strategie des Fortschritts“ und in einer Artikelserie in der „Neuen Zürcher Zeitung“ in diesem Kontext. 1987 prägte die Brundtland-Kommission dann mit ihrem Bericht „Unsere gemeinsame Zukunft“ das Konzept der nachhaltigen Entwicklung, wie es heute in aller Munde ist.

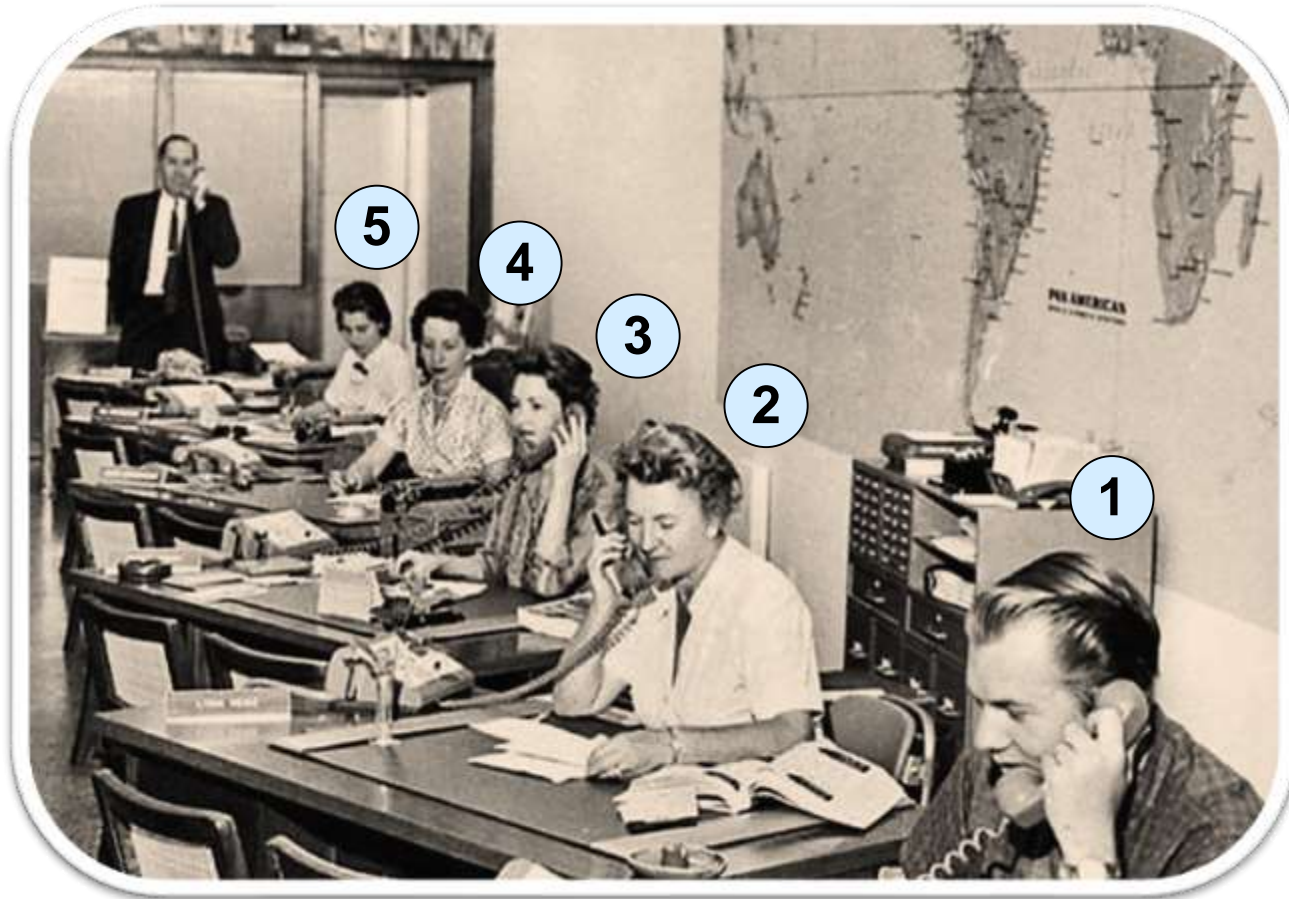
*Ernst Basler (geb. 1929 in Thalheim an der Thur, ZH) studierte nach der Sekundärschule in Andelfingen und der Kantonsschule in Winterthur (ebenso wie später sein Zwilingsbruder und langjährige SVP-Nationalrat Konrad) von 1949 bis 1954 Bauingenieurwesen an der ETH Zürich, gefolgt von einem viersemestrigen Studienaufenthalt am MIT. Dissertation 1960 an der ETH Zürich zu „Untersuchungen über den Sicherheitsbegriff von Bauwerken“, worin die Bruchwahrscheinlichkeit von Gebäudeteilen mit statistischen und wahrscheinlichkeitstheoretischen Methoden formalisiert wird. 1963 Mitbegründer des Ingenieurbüros Basler & Hofmann, aus der 1981 die Firma Ernst Basler & Partner AG (EBP) in Zollikon hervorging. 1969-70 Gastdozent am MIT, dabei Entwicklung der Idee des nachhaltigen Wirtschaftens.*



FAZ, 28.6.2017

# Zurück zur **Simulationstechnik**: Eine weitere Simulationsanwendung

Telefonische Buchung bei einem **Reisebüro-Call-Center**



„Die Beispiele, die in der Vorlesung gegeben wurden, müssen wieder überdacht werden, da viele Beispiele altmodisch waren.“  
[Aus dem „Feedback“ zur Vorlesung]

# Eine weitere Simulationsanwendung

## Telefonische Buchung bei einem Reisebüro-Call-Center

- 1) 5 Angestellte nehmen Buchungen entgegen
- 2) 18 Telefonleitungen (d.h. bis zu 13 Anrufer warten)
- 3) „Bitte etwas Geduld“, wenn alle Angestellten belegt
- 4) Angest. wird frei → am längsten wartenden Anrufer bedienen

Warteschlange

- 5) Wartebereitschaft normalverteilt (im Mittel 4 Minuten)
- 6) Endgültiger Verzicht eines Kunden, wenn keine Leitung frei oder wenn Wartebereitschaft überschritten
- 7) Zwischenankunftszeiten exponentialverteilt (20 Sek.)



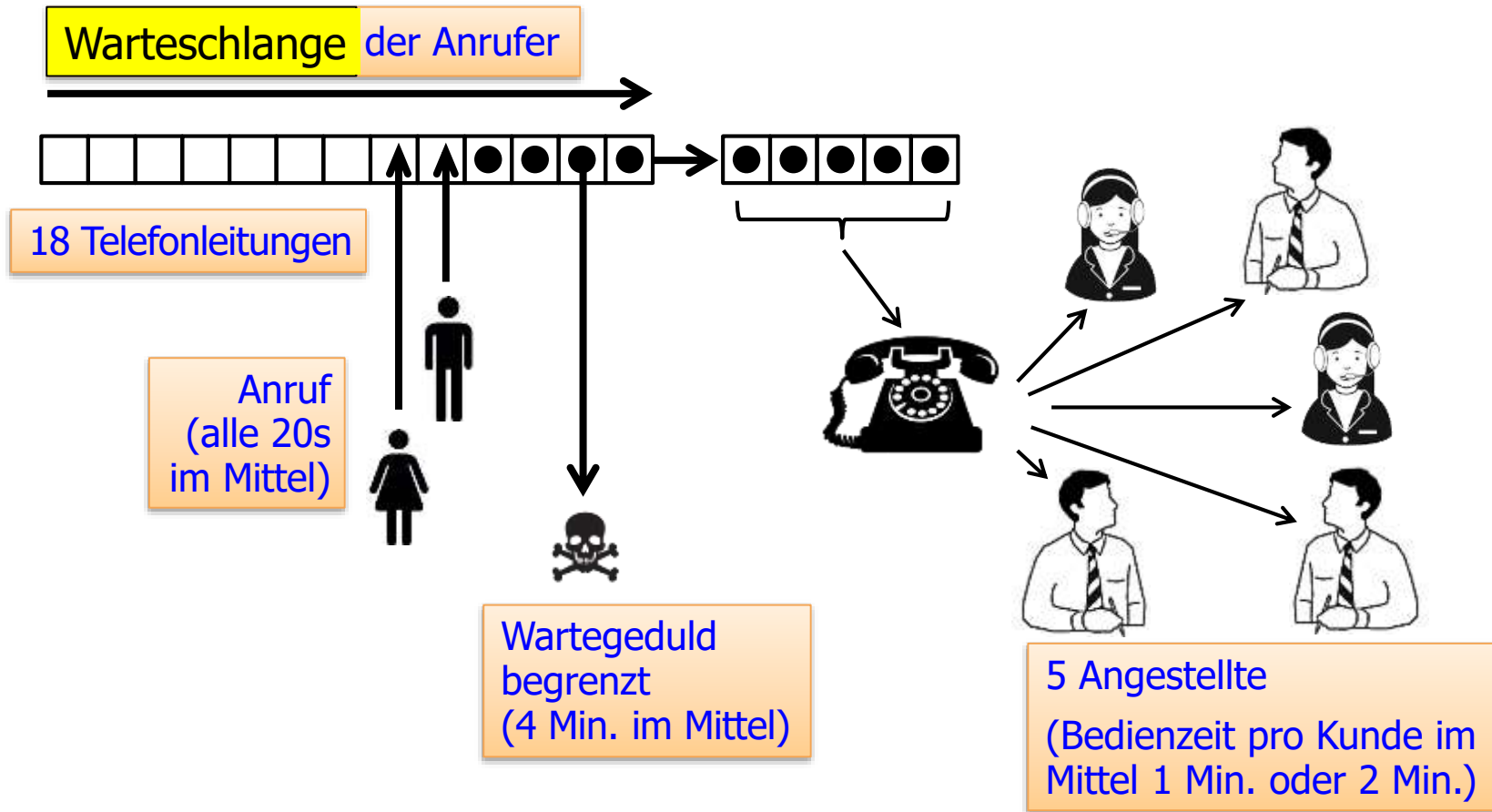
- 8) Bedienzeit exponentialverteilt  
(25% der Kunden im Mittel 1 Min.; 75% 2 Min.)

Stochastische Simulation  
(→ Zufallszahlengenerator)





# Systemspezifikation



# Typische Fragestellungen für Simulationsexperimente

- 1) Mehr Angestellte → Kosten vs. Nutzen?
- 2) Ausfall von Angestellten → Konsequenzen?
- 3) Verkürzung der Bedienzeiten um 10% → Konsequenzen?
- 4) Bei Musik in der Warteschleife warten Kunden 25% länger → Konsequenzen für Systemleistung (und Profit)?
- 5) 50%ige Steigerung der Anrufrate vor Feiertagen → Auswirkung auf Auslastung, Anzahl bedienter / verärgerter Kunden?

# Simulativ zu bestimmende Leistungskennzahlen

## *Key Performance Indicators*

- Mittlere Wartezeit der Anrufer (→ ca. 70 Sekunden)
- Auslastung der Angestellten (→ ca. 91%)
- Auslastung der Leitungen (→ ca. 45%)
- Anzahl bedienter Anrufe (→ 15800 = 88%)
- Anzahl „verzichtender“ Kunden (→ 2160 = 12%)
- Anteil der erfolglosen Anrufe (→ 161 von ca. 18000)

## *Sneak preview*

Ergebnis nach **100 Stunden Simulationszeit**  
(= simulierter Zeit)





# Call-Center zeitgesteuert simulieren?

- **Prinzip:**
  - Simulationsuhr pro Simulationsschritt um  $\Delta t$  erhöhen
  - Alle „realen“ Zustandsänderungen während des **Intervalls**  $[T, T+\Delta t]$  zum simulierten **Zeitpunkt**  $T+\Delta t$  nachbilden
- **Bei jedem einzelnen Schritt** prüfen und (mit Simulationszeitpunkt) für die Auswertung festhalten:
  - Sind „zwischenzeitlich“ Anrufe gekommen?
  - Sind Angestellte freigeworden?
  - ...

# Wahl von $\Delta t$ ?

- $\Delta t = 1 \mu s$  (Simulationszeit, nicht Rechenzeit!)
  - Zustandsänderung bei einem Schritt ist sehr unwahrscheinlich
  - Viele nutzlose Schritte
  - 100 Stunden  $\triangleq$  360 000 000 000 Schritte → **sehr langsam!**
- $\Delta t = 1000 s$ 
  - Warteschlange hat „plötzlich“ ca. 50 Kunden!
  - Alle Angestellten sind am Anfang lange unbeschäftigt
  - **Fehlerhafte Statistiken!**
- $\Delta t = 1 s$ 
  - Nur etwa in jedem zehnten Schritt geschieht etwas
  - Wie „genau“ und gut ist dieser **Kompromiss?**

**Ereignisgetrieben** geht es sowohl genauer als auch effizienter!

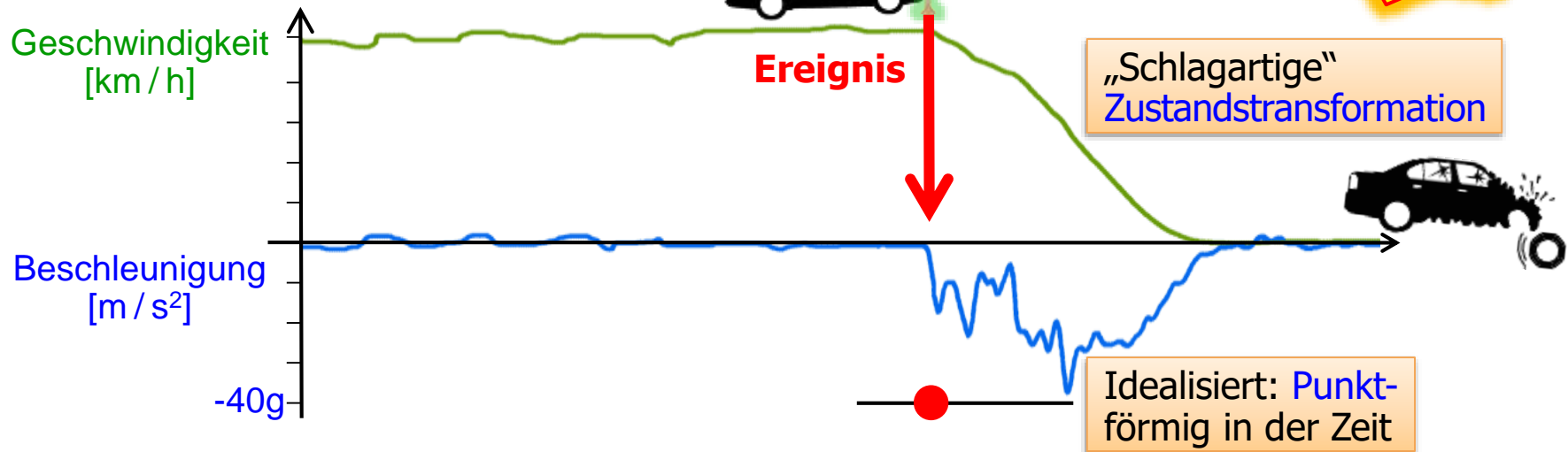
**Überspringt** automatisch Zeitintervalle, in denen nichts Relevantes geschieht.

# Ereignis = „Plötzliches, bemerkenswertes und bedeutsames Geschehnis mit Folgen“

Nach einem Ereignis ist anderes möglich als **vorher**, auch wenn das Ereignis selbst bestandslos ist

- **Beispiel:** Schadensereignis (Auslöser des Versicherungsfalls)

*I was proceeding down the road. The trees on the right were passing me in an orderly fashion at 60 miles an hour. Suddenly one of them stepped out into my path. Boom! -- John von Neumann*



- **Weitere Beispiele:** Mausklick, Blitz, am Ziel ankommen, Geburt (freudig), Tod (traurig)
- *Raymond **lisait** tranquillement son journal lorsque soudainement la porte **claqua**.* (→ Aspektdifferenzierung romanischer Sprachen: Handlungsverlauf vs. **Inzidenzakt**)



# Ereignis = „Plötzliches, bemerkenswertes und bedeutsames Geschehnis mit Folgen“



- „Sich ereignen“ von „sich eräugnen“, d.h. vor Augen treten, sichtbar werden; daraus dann die heutige Bedeutung „sich zeigen“ bzw. „geschehen“

II. Eräugnet sich nun, daß kein Rest übrig bleibt, oder auch, daß der mit der folgenden Ziffer vermehrte Rest noch immer kleiner sey, als der Divisor, so setze man, so oft sich dieses eräugnet, in dem Quotienten an die gehörige Stelle eine Nulle. Geschieht nun dieses bey der letzten Ziffer des Dividendus, so setze man in dem Quotienten die Nulle an, und füge darnach den nämlichen Rest als einen Bruch hinzu; z. B.

5 in 43 geht 8 mal; 8 mal  
54 sind 432; 432 von  
435 bleiben 3; 5 in 3,  
das ist 54 in 32 geht 0 mal  
u. s. w.

$$435257 : 54 = 8060\frac{17}{54}$$

432			7
325			17
324			17
			17

Eräugnet sich nun, daß kein Rest übrig bleibt, oder auch, daß der mit der folgenden Ziffer vermehrte Rest noch immer kleiner sey, als der Divisor, so setze man, so oft sich dieses eräugnet, in dem Quotienten an die gehörige Stelle eine Nulle. [Georg Freiherr von Vega: Vorlesungen über die Mathematik – Erster Band, welcher die allgemeine Rechenkunst enthält, 1782]

- „Ereignis“ bzw. Eräugniß s.d. 18. Jh.; vorher: „Ereignung“ / „Eräugnung“
- Engl. „event“ geht zurück auf lat. „eventus“ (herausgekommen), Partizip des Verbs „evenire“ [ex-venire] (heraus-, hervorkommen); „eventus“ als Substantiv mit der Bedeutung „Ausgang, Folge, Ergebnis, Vorfall“

# Ereignisgesteuerte Simulation

- **Grundannahme:** Zustand bleibt abschnittsweise konstant; es passiert nichts von Relevanz zwischen zwei Ereignissen
  - Zeit springt von Ereignis zu Ereignis
  - Nur Ereignisse ändern den Zustand

Die **Kunst des Modellierens** besteht darin, diese Grundannahme zu respektieren

- **Typische Simulationsereignisse**

- Anruf eines Kunden
- Betreten eines Aufzuges
- Anstellen an die Warteschlange
- Bearbeitungsende eines Werkstücks



Generell: **Anfang** bzw. **Ende** einer ansonsten ereignislosen **Aktivität**

Der Fortschritt der Simulation wird also nicht durch Ändern einer Simulationsuhr getrieben; stattdessen werden umgekehrt die Simulationsuhr und **die Welt von den stattfindenden Ereignissen vorangetrieben**

„event driven“

- **Ein Ereignis:**

- Hat einen **Eintrittszeitpunkt** (in Simulationszeit)
- Bewirkt beim „Stattfinden“ eine **schlagartige Zustandsänderung**

# Was treibt die Welt voran?



Raffael stellt 1508 in einem Eckfresko der Gewölbedecke der **Stanza della Segnatura** (Apostolischer Palast, Vatikan, Rom) einen „primären unbewegten Beweger“ (*primus motor immobilis*) in Gestalt der Urania, der Muse der Astronomie, dar, der nach der Metaphysik von Aristoteles die Welt antreibt.



Die Schule von Athen (Raffael)



# Was treibt die Welt voran?

Im letzten Buch der Physik (Buch VIII) und im Vorfeld seiner Theologie (Buch XII) argumentiert **Aristoteles** für die Notwendigkeit eines „unbewegten Bewegers“, d.h. einer Kraft, die alle Bewegung auf der Welt verursacht. Wenn die Bewegung einen Anfang gehabt hätte, so nur durch eine andere Bewegung, die dem Anfang schon vorausgegangen war. Etwas wird nur aktuell durch ein anderes Aktuelles, das seinerseits etwas voraussetzt, bis man zu einem ersten unbewegten Bewegenden (**primus motor immobilis**) kommt, das aus sich selbst reine Aktualität ist.

## **De aeternitate mundi** MAGISTRI BOETII DACI

Boethius von Dacien war ein vehementer Vertreter der Metaphysik von Aristoteles; er lehrte im 13. Jhd. an der Pariser Universität

Natura non potest causare aliquem motum novum, nisi ipsum praecedat alius motus qui sit causa eius. Sed primum motum non potest alius motus praecedere, quia tunc ipse non esset primus motus. Ergo naturalis, cuius primum principium est natura, non potest ponere secundum sua principia primum motum esse novum. Maior patet, quia natura materialis nihil agit de novo nisi prius agatur ab alio; natura enim materialis non potest esse primus motor. Quomodo enim ens genitum erit primus motor? Et omne agens materiale est ens genitum. Nec est instantia de corpore caeli, quia si sit ens materiale, tamen non habet materiam univoce cum rebus generabilibus.



# Was treibt die Welt voran?



Vor dem weltweit ersten Ereignis gab es noch keine Zeit, oder?

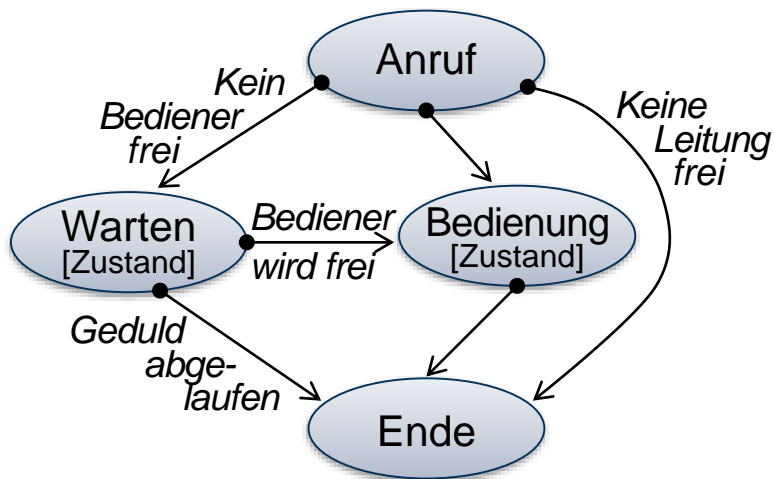


# Zurück zu unserer Miniwelt: Modellentwurf des Reisebüros

- **Schnappschuss-Zustand** des Modells zu einem bestimmten Zeitpunkt:
  - Angestellten-Status (frei / beschäftigt)
  - Anzahl freier Leitungen
  - Liste z.Z. wartender Anrufer



- **Ereignisbedingte Zustandsübergänge**
  - Aus Sicht eines individuellen Kunden:



## Ereignistypen (Kanten im Zustandsgraphen):

- Beginn Bedienung / Beginn Warten (nach Anruf)
- Ende Warten (freie Angestellte / abgelaufene Geduld)
- Ende Bedienung



# Der ereignisgesteuerte Simulationsablauf

## Der Initialzustand



08:00

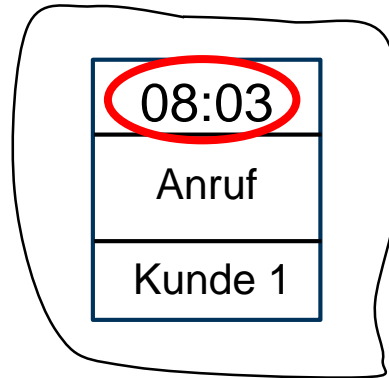


18



5

frei



Ein erster „vorhergesehener“ Kundenanruf

Zeit springt, getrieben durch das erste Ereignis

*Zustand vor Stattfinden des ersten Ereignisses*

*Zustand unmittelbar danach*



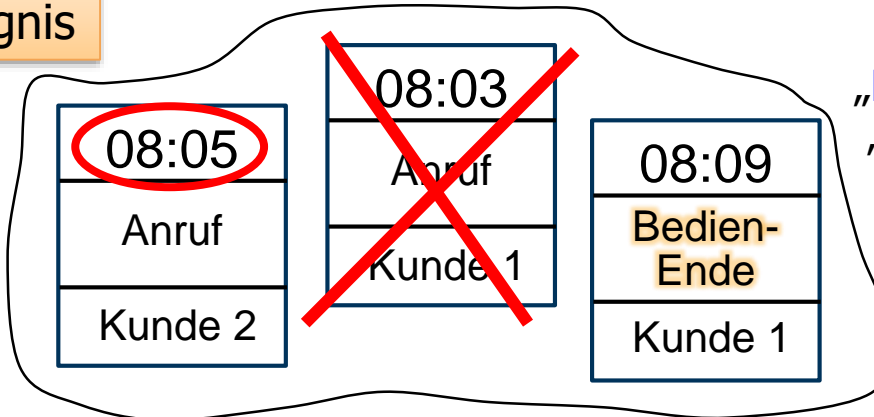
08:03



17



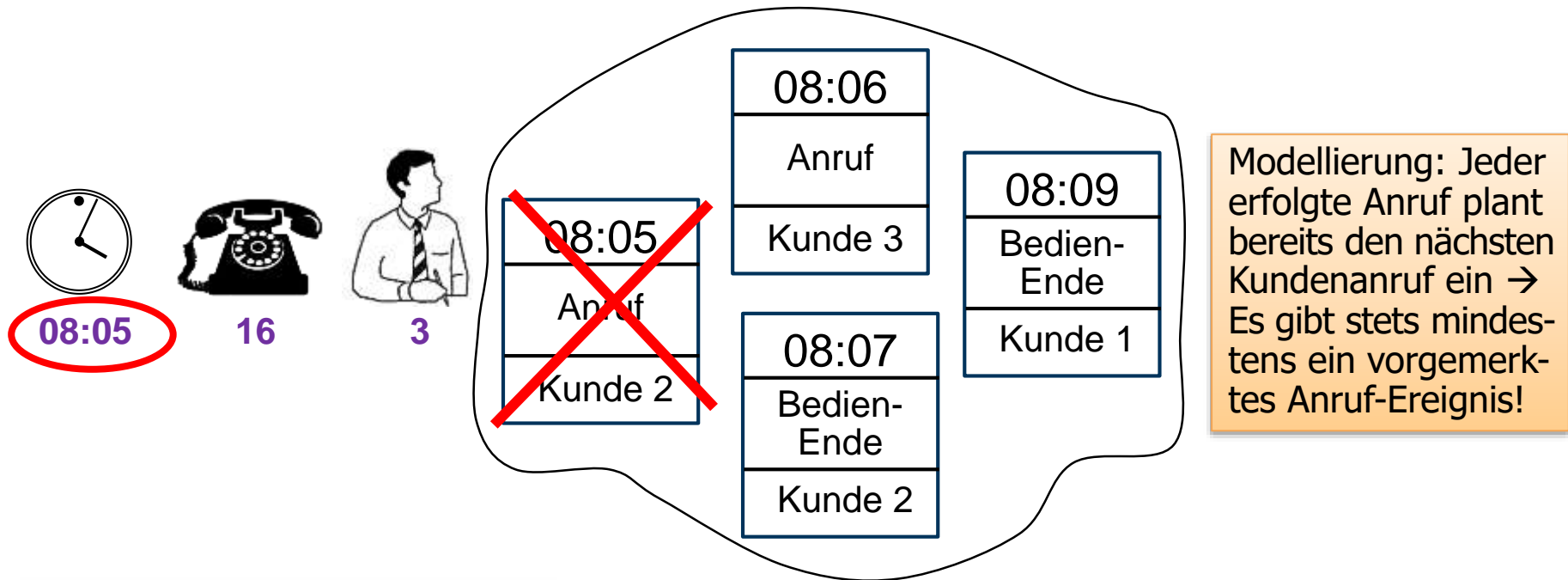
4



„Ereignisliste“ (bzw. „pending event set“): Menge der z.Z. vorgemerktten Ereignisse; realisiert in Form sogenannter „Ereignisnotizen“

Bedien-Ende-Ereignis wird bereits bei Beginn der Bedienung vorgemerkt!

# Der ereignisgesteuerte Simulationsablauf (2)



Etc., bis zu folgendem Zustand:  
(keine Angestellten mehr frei!)



- 5 eingeplante Bedien-Ende-Ereignisse
- 1 eingeplantes Anruf-Ereignis

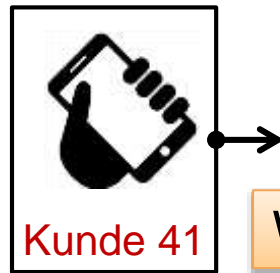


# Der ereignisgesteuerte Simulationsablauf (3)



- 5 eingeplante Bedien-Ende-Ereignisse
- 1 eingeplantes Anruf-Ereignis

08:55
Geduld- Ende
Kunde 41



Wartende Kunden

Warteschlange wird durch das „Eintreten“ eines Anrufes erzeugt, falls der Kunde nicht sofort bedient wird, sondern warten muss



# Der ereignisgesteuerte Simulationsablauf (4)



08:57



9



0

- Noch 3 eingeplante Geduld-Ende-Ereignisse
- ...



Warteschlange

Frühester Kunde kommt als nächster dran (FIFO)

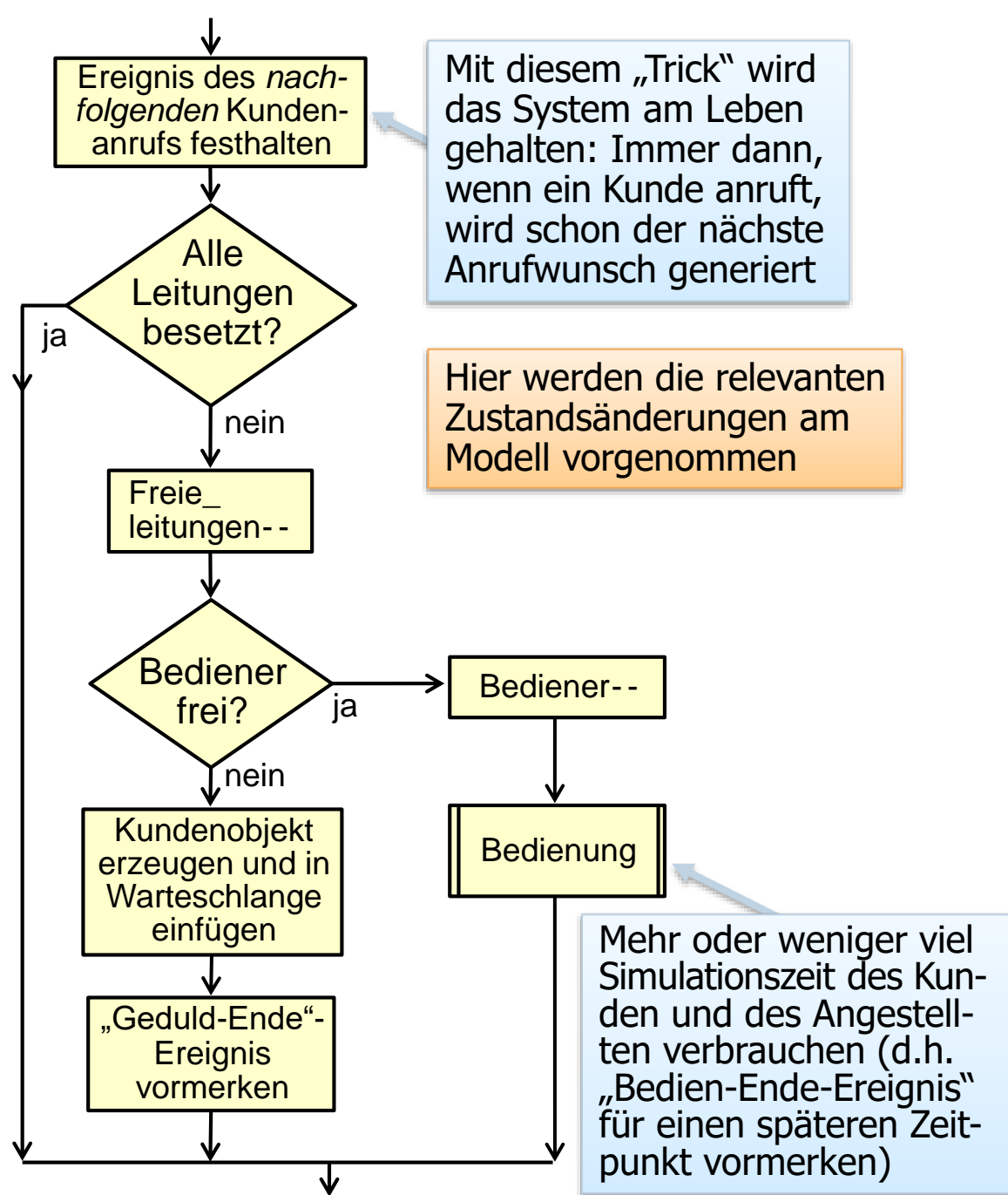
Kunde 46 hat soeben aufgegeben (Geduld-Ende!)

...und so weiter...

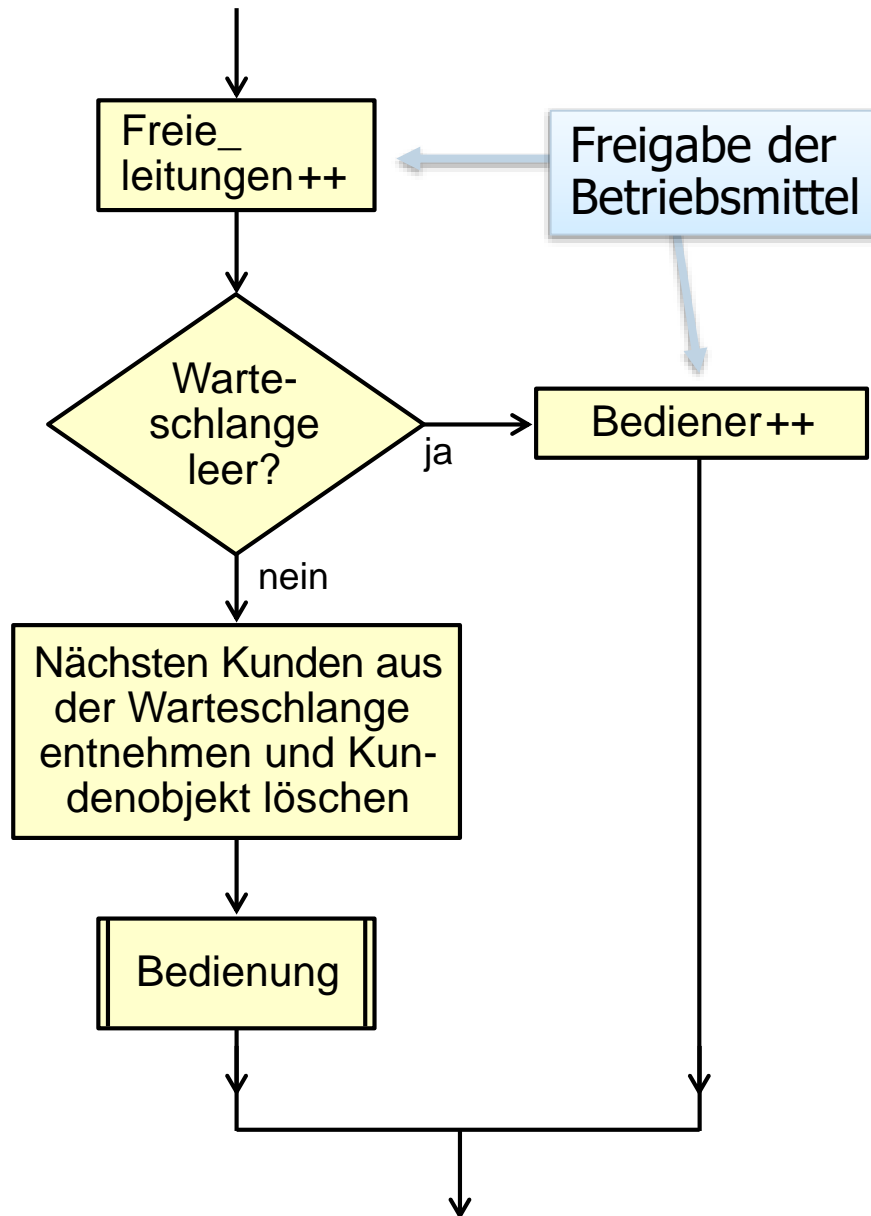


# Ereignisroutine „Kundenanruf“

Ereignisroutinen (*event handler*) werden bei „Eintreten“ von Ereignissen des entsprechenden Typs ausgeführt



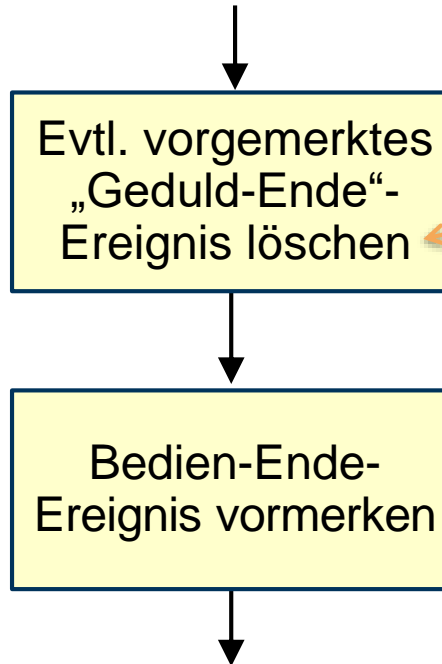
# Ereignisroutine „Bedien-Ende“





# Methode „Bedienung“

Die Methode wird in den Ereignisroutinen „Kundenanruf“ und „Bedien-Ende“ aufgerufen

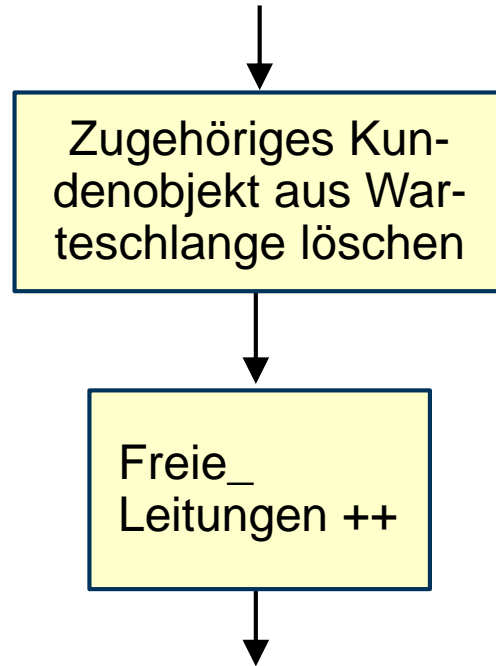


„Cancel“-Operation (vgl. Abstellen des Weckers, weil man schon vorzeitig aufgewacht ist)

Der eigentliche Vorgang der **Bedienung** ist **irrelevant** für die Simulation und wird nicht modelliert; der Simulator wird erst wieder durch das Eintreten des Bedienungsende-Ereignisses aufmerksam



# Ereignisroutine „Geduld-Ende“



# Statistik und Animation

- Evtl. zusätzliche Pseudo-Aktionen in den Ereignisroutinen durchführen, um **Statistikdaten** zu sammeln
- Evtl. auch „**Animation**“ durch Ausgabeanweisungen in den Ereignisroutinen, z.B.:

- **08:17**, Kunde 29 ruft an
- **08:19**, Kunde 26 wird bedient
- **08:20**, Angestellter 3 beendet Bedienung von Kunde 24
- **08:27**, Kunde 28 gibt nach 5 Minuten Warten entnervt auf

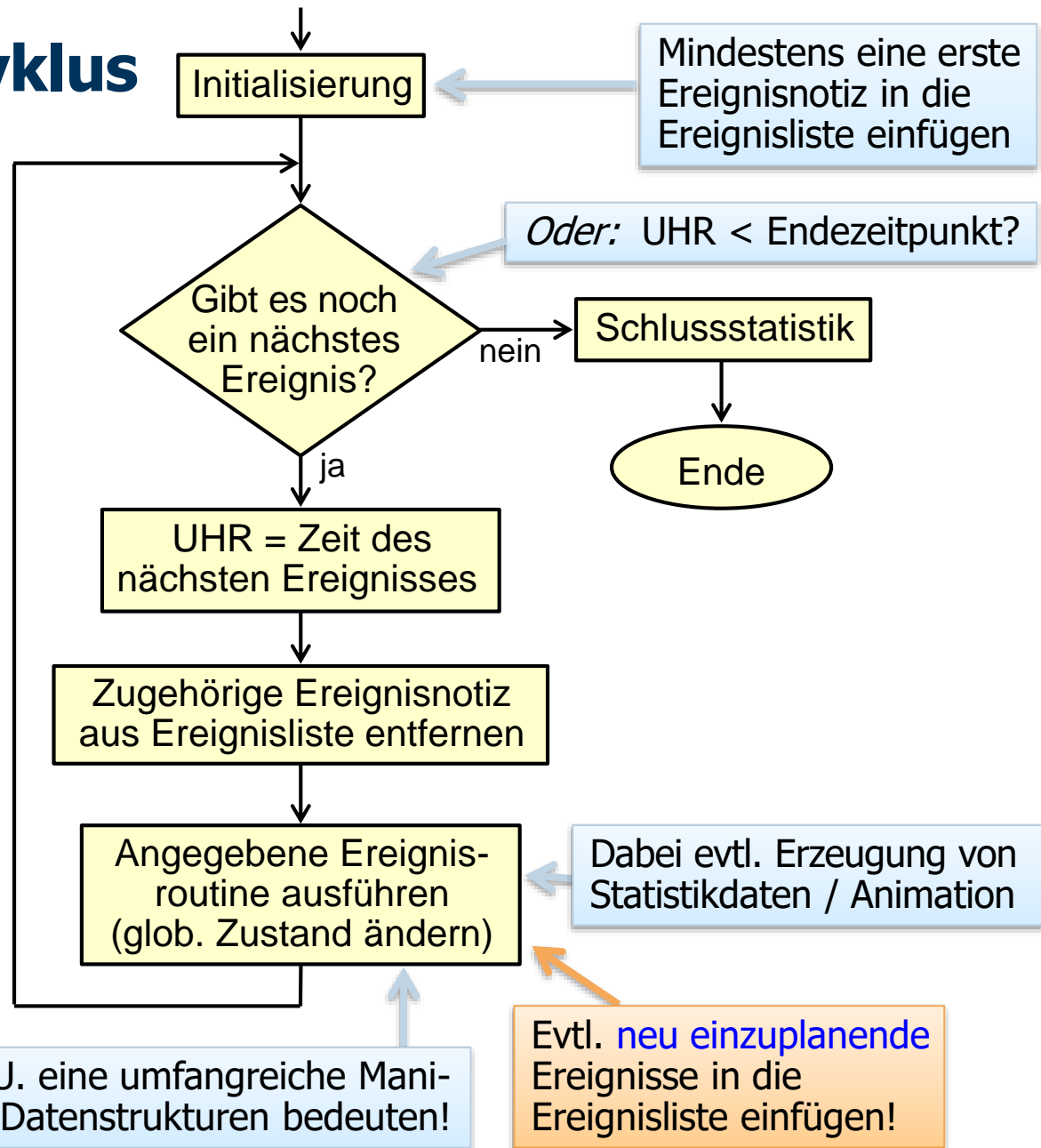
Die **Zeit** ist in einem so erzeugten Ereignisprotokoll **monoton steigend**



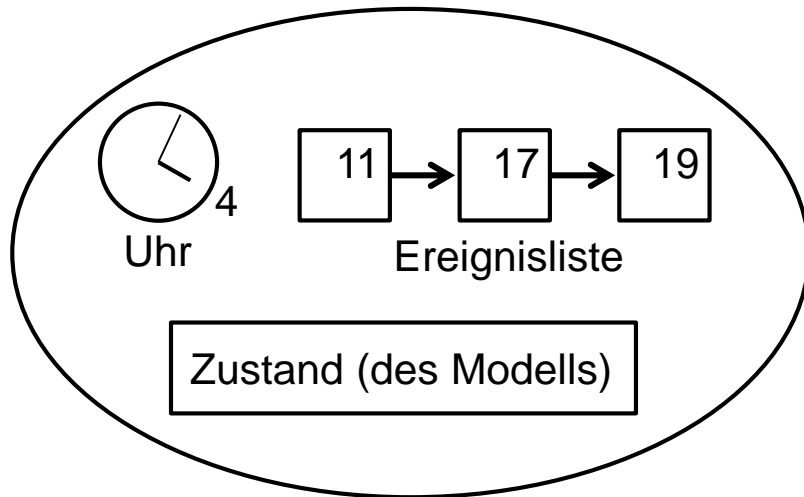
# Der Simulationszyklus (ereignisgesteuert)

## Prinzip:

- Führe die Aktion des jeweils (chronologisch) **nächsten eingeplanten Ereignisses** aus
- Dabei können **neue Ereignisse „entstehen“**



# Ereignisgesteuerter Simulator



Simulator enthält ausserdem noch Programmcode (Ereignisroutinen, Steuerung des Simulatorzyklus, Ausgabestatistik,...)

Ereignisnotizen in der Ereignisliste enthalten einen **Eintrittszeitpunkt**

**Simulationszeit („Uhr“)** springt zum jew. **nächsten Ereignis**

- Ausführung der zugehörigen Ereignisroutine, dabei:
- Änderung des (globalen) Zustands
- Evtl. Einplanen neuer Ereignisse (in der „Zukunft“)

Simulationszyklus

# Quasi-Parallelismus

Pour moy, j'ay marqué plus d'une fois que je tenois l'espace pour quelque chose de purement relatif, comme le temps. Le temps est un ordre de successions. ... C'est un rapport, un ordre, non seulement entre les existants, mais encor entre les possibles comme s'il existoient. – G.W. Leibniz.

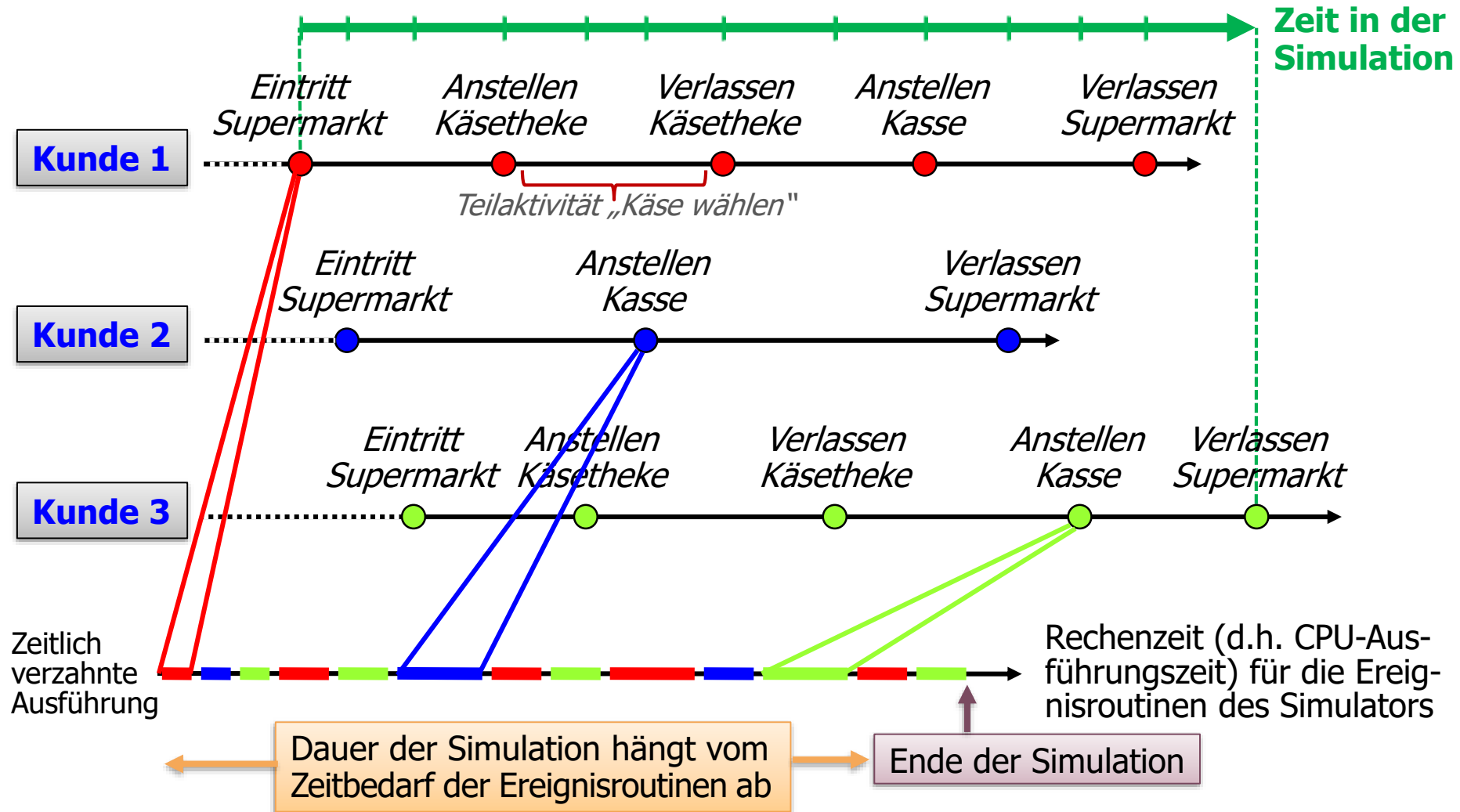
- In der **Realität gleichzeitig** ablaufende **Aktivitäten** werden in der Simulation abschnittsweise **sequentialisiert**
- Durch die **Auflösung in Ereignisse** (am Anfang und Ende von Teilaktivitäten) werden Aktivitäten **zeitlich verzahnt**
- **Beispiel:** Zwischen Ankunft- und Abgangereignis eines Supermarktkunden (also während dieser mit Einkaufen als Teilaktivität beschäftigt ist) betreten weitere Kunden das Geschäft

---

Supermarkt und Reisebüro-Callcenter sind natürlich nur Einzelbeispiele einer grossen Klasse von Anwendungen (Arztpraxis, Tankstelle, Produktionsprozess, Frachthafen, Paketverteilzentrum, Signale in einer Digitalschaltung, Computernetze,...) mit vielen (quasi-)parallelen und teilweise miteinander wechselwirkenden Aktivitäten, die sich ereignisorientiert gut simulieren und analysieren lassen.



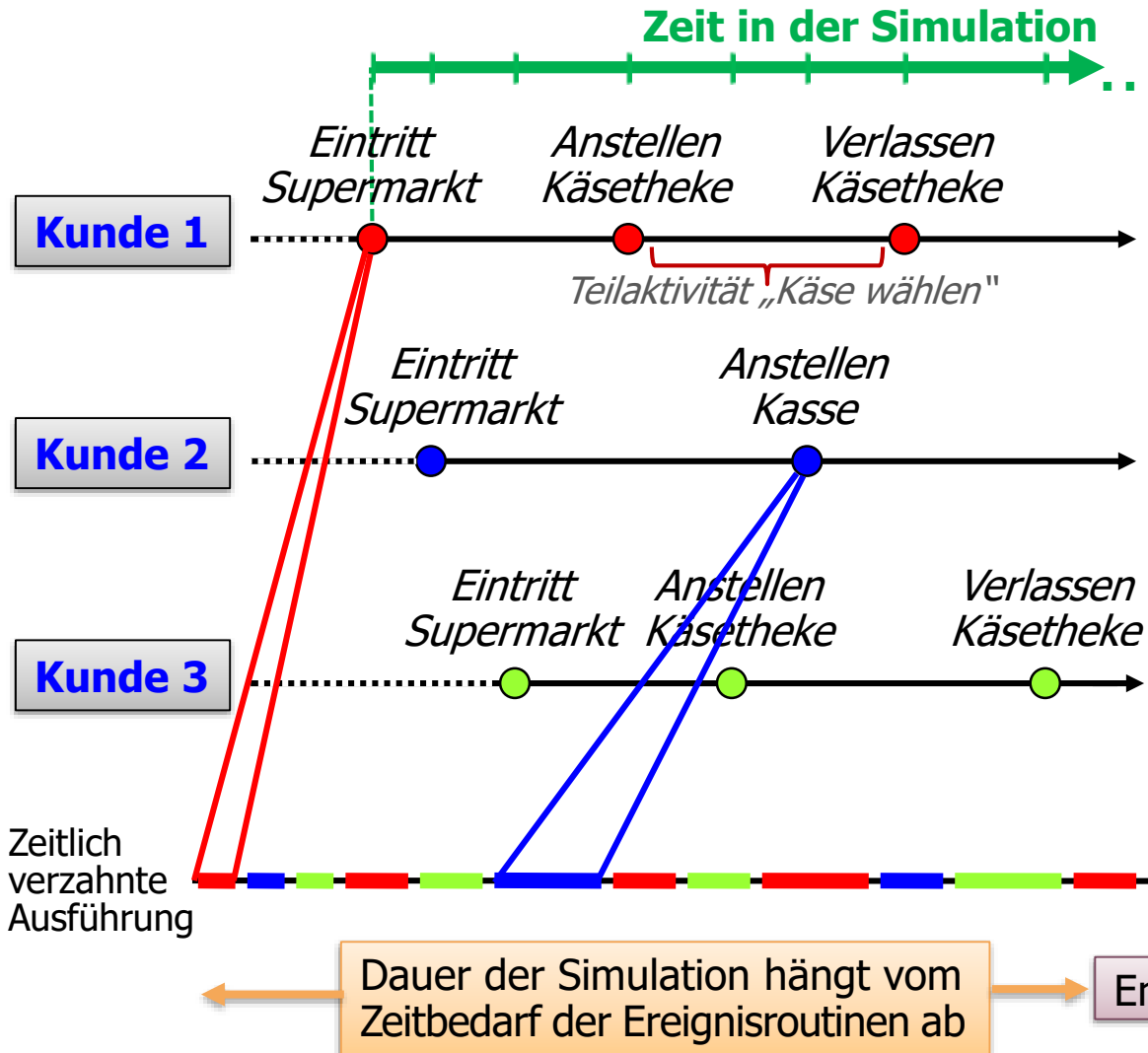
# Quasi-Parallelismus: Beispiel



# Quasi-Parallelismus: Beispiel



Beachte den Dualismus der beiden Zeitbegriffe!



**Ereignisse** geschehen in Simulationszeit **instantan**, der Simulator benötigt zur Ausführung zugehöriger Ereignisroutinen aber **Rechenzeit**.

**Zwischen Ereignissen** vergeht Simulationszeit, der Simulator überspringt aber diese „ereignislosen Aktivitäten“ und benötigt dafür **keine Rechenzeit**.

**Denkübung:** Lässt sich die Rechenzeit durch Parallelausführung auf mehreren CPUs vermindern?

# Modellierung paralleler Aktivitäten

- Die **Modellierungskunst** besteht darin, die einzelnen Aktivitäten der Realität so in Teilaktivitäten mit begrenzenden Ereignissen aufzulösen, dass
  - die **Wechselwirkung** zwischen den Aktivitäten auf die Ereignisse beschränkt bleiben;
  - die **Ereignisse** sich korrekt gegenseitig **einplanen**;
  - die zugehörigen Ereignisroutinen die **Zustandsänderung des Modells** korrekt wiedergeben;
  - das Gesamtverhalten die **Realität adäquat** widerspiegelt.

Gibt es verschiedene Ereignisse mit exakt gleichem Eintrittszeitpunkt? Soll es sie geben? (Wenn ja, in welcher Reihenfolge sollen sie bearbeitet werden?)



# Beispiele für das Einplanen von Ereignissen

- **Abfahren eines Autos** an einer Kreuzung bewirkt Einplanung des **Ankunftseignisses** zu einem späteren Zeitpunkt bei einer anderen Kreuzung
- Ein Kassierer „würfelt“ das **Bedienungsende** des Kunden aus, sobald er mit der Bedienung des Kunden beginnt
- Ein beim Supermarkt eintreffender Kunde „würfelt“ den **Ankunftszeitpunkt des nächsten Kunden** aus



Das ist ein sehr **effektiver Trick**: Auf diese Weise muss man nicht initial alle jemals eintreffenden Kunden als vorgemerkte Ereignisse in die Ereignisliste einfügen; es ist statt dessen immer nur der jeweils nächste eintreffende Kunde vorgemerkt!

→ „**Scheinkausalität**“:  
In Wirklichkeit ist das Eintreffen eines Kunden *nicht* die Ursache für das Eintreffen eines weiteren Kunden!

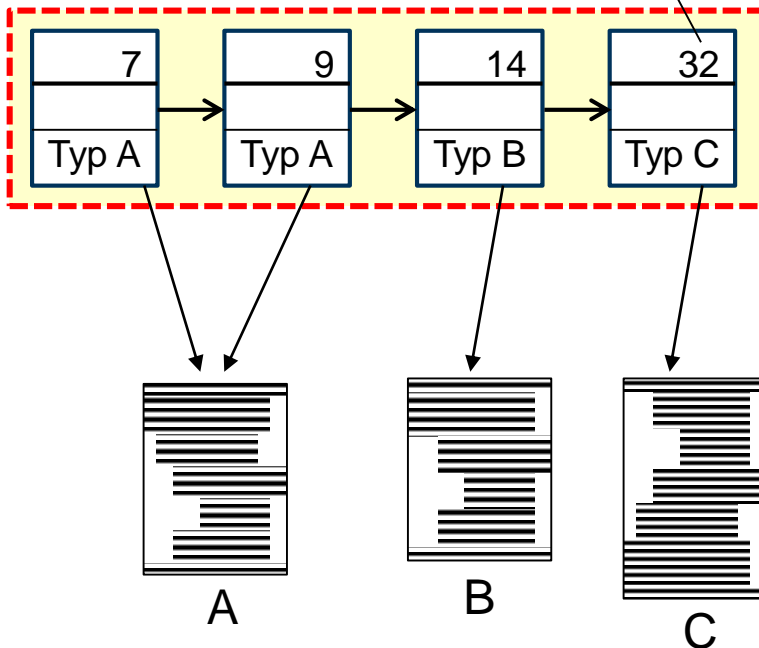
# Zeit- vs. ereignisgesteuerte Simulation

- Verkörpern unterschiedliche „Weltsichten“ bzw. Paradigmen
- Zeitgesteuerte Simulation geeignet, wenn:
  - Ein **Zeittakt** in natürlicher Weise existiert (z.B. bei Animationen)
  - System aus **vielen gleichartigen Elementen** besteht, deren Entwicklung in der Zeit sich alle auf ähnliche Art fortschreiben lassen
  - Ein **kontinuierliches System** (Bsp.: Füllstand eines Stausees) durch mathematische Gleichungen (z.B. Differentialgleichungen) beschrieben ist, die mit einem ausreichend feinen Zeitraster berechnet werden
- Ereignisgesteuerte Simulation geeignet, wenn:
  - Modell aus **unterschiedlichen Objekten** besteht, die „sporadisch“ miteinander wechselwirken (→ Eintreten eines Ereignisses)
  - Zustandsänderungen des Systems durch solche **Ereignisse** definiert sind

# Ereignisverwaltung bei der Simulation

## 4 Ereignisnotizen

Eintrittszeitpunkt



## Ereignisliste

(Hier dargestellt als verkettete Liste, sortiert nach Eintrittszeitpunkt)

## Ereignisroutinen

Ereignisnotizen benennen den Eintrittszeitpunkt und die Ereignisroutine (d.h. den Ereignistyp) eines eingeplanten (d.h. noch auszuführenden) Ereignisses

Die Ereignisliste speichert alle Ereignisnotizen und liefert früheste auf Anforderung des Simulators

Ereignisroutinen („event handler“) enthalten Anweisungen zur Änderung des Modellzustands (sowie evtl. zum Einplanen weiterer Ereignisse, d.h. Einfügen neuer Ereignisnotizen in die Ereignisliste)



# Your Job Today

Your job today is to sit behind a counter and manage a group of objects (four-inch cubes, each with a unique number) that people will be working with.

Specifically, you have to:

1. Collect cubes that people come by and drop off.
2. When somebody asks for a cube, you have to give him the lowest-numbered cube you currently have in your possession.

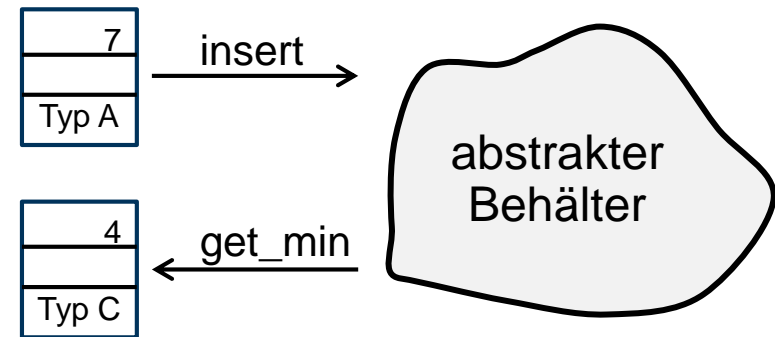
*That's all you have to do.*



# Ereignisliste als abstrakter Datentyp

- Die Ereignisliste muss man nicht als verkettete Liste realisieren:
- Insert** fügt eine Ereignisnotiz in einen „abstrakten Behälter“ ein
- Get\_min** liefert die Ereignisnotiz mit dem **kleinsten** Zeitstempel der im Behälter z.Z. gespeicherten zurück und entfernt diese aus dem Behälter (Exception falls Behälter leer war)

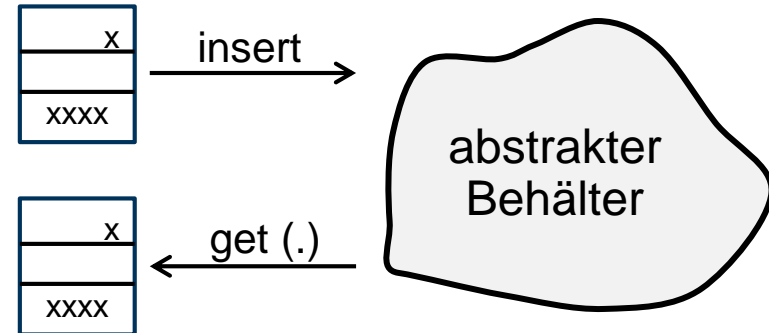
Definiert durch die *Wirkung* der Operationen, nicht durch eine *Implementierung*



Eine Datenstruktur mit diesen beiden Operationen heisst „**Priority Queue**“

- Beispiel:** Die Folge von Operationen `insert(5); insert(2); insert(8); get_min; insert(4); insert(7); get_min;` liefert: 2; 4

# Auch ein abstrakter Behälter...

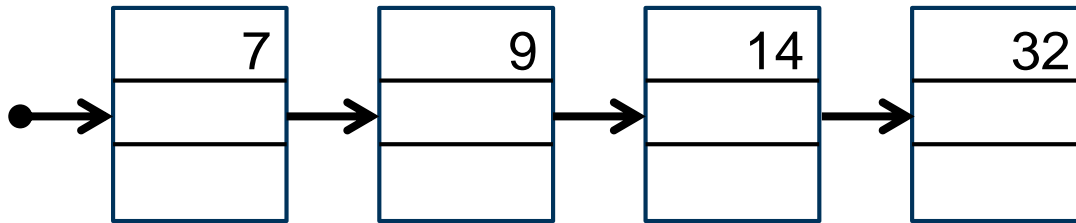


„Der Kunde bedient hierbei einen zentralen Abgabe- und Abholautomaten. Nach Entrichten des Mietbetrags am Automaten wird durch ein automatisches Fördersystem ein leerer Behälter zur Aufnahme des Gepäcks bereitgestellt, in den der Reisende sein Gepäck einstellt. Nachdem dies erfolgt ist, fährt der Behälter ebenfalls automatisch in ein zentrales automatisiertes Lager, wo er für die Dauer der Aufbewahrung verbleibt. Für den Kunden ist dieser Vorgang nicht zu bemerken, was häufig zu Irritationen und Missverständnissen führt.“ [de.wikipedia.org](https://de.wikipedia.org)



# Implementierung von Priority Queues

## 1. Implementierung: Sortierte verkettete Liste



- → **insert** benötigt  $O(n)$  Schritte  
(richtige Stelle finden und dort einfügen)
- → **get\_min** benötigt  $O(1)$  Schritte  
(vorderstes Element entfernen und zurückliefern)

Für ein „zufälliges“  
Element (bei  
Gleichverteilung)

$n$  = Anzahl der Ele-  
mente in der Liste

Diese Realisierung gibt der „Priority Queue“ ihren Namen: Eine Warteschlange („queue“), die aber nicht wie üblich nach Ankunftsreihenfolge (FIFO) geordnet ist, sondern nach Prioritäten

# Implementierung von Priority Queues

## 2. Implementierung: Unsortierte verkettete Liste

- → **insert** benötigt  $O(1)$  Schritte  
(z.B. vorne anfügen)
- → **get\_min** benötigt  $O(n)$  Schritte  
(kleinstes Element suchen und ausketten)

Ist diese Lösung besser oder schlechter als die vorherige?

---

## 3. Implementierung: Heap-Datenstruktur

„partiell“ sortiert

- → **insert** und **get\_min** benötigen *beide*  nur  $O(\log n)$  Schritte

Denkübung: Wieso eigentlich nicht einen Suchbaum verwenden? Da kann man doch auch schnell einfügen und das Minimum schnell finden, oder?

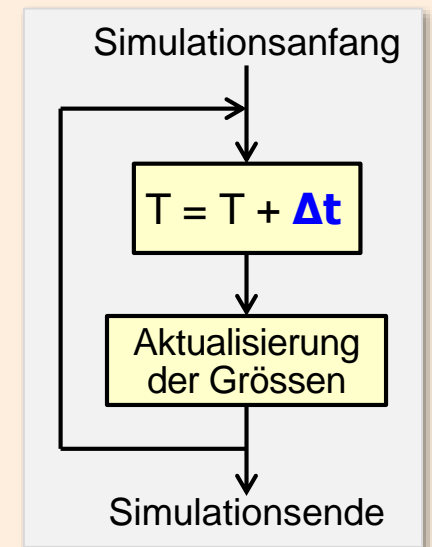
# Resümee des Kapitels

## ■ Simulation

- Zweck
- Anwendungsgebiete: diverse Beispiele
- Historie der numerischen Wetterprognose
- Modell, Modellierung und Abstraktion

## ■ Zeitgesteuerter Simulation

- Beispiel „Weizen, Mäuse, Katzen“: Von der Spezifikation zum ausführbaren Simulationsmodell
- Simulationszyklus: Iterative Neuberechnung der Zustandsgrößen für  $T + \Delta t$  aus den Zustandsgrößen der vorangehenden Zeitepoche





# Resümee des Kapitels (2)

- Ereignisgesteuerte Simulation
  - Ereignisse treiben die Simulation (inklusive Simulationszeit!) voran
  - Modellierung quasi-paralleler Abläufe durch global verzahnte Ereignisfolgen
  - Simulationszyklus: Sprung zum chronologisch nächsten Ereignis; Zustandsaktualisierung; Einplanung zukünftiger Ereignisse
  - Beispiel: Reisebüro-Call-Center (Ermittlung relevanter Leistungskenngrößen)

