

Als Derivate der Urform des Moore'schen Gesetzes (dem Wachstum der Transistorendichte auf Chips) können wir viele verbundene oder verwandte exponentielle Wachstumsgesetze finden, auf der technischen Seite etwa

- die Speicherdichte von Speichermedien wie Magnetplatten,
- die Übertragungsgeschwindigkeit von festen Datenleitungen und
- die Bandbreite von drahtlosen Verbindungen.

Auf der Anwendungsseite sind Beispiele (sozusagen Moore'sche Beziehungen höherer Ordnung)

- die gespeicherte Datenmenge pro Benutzer oder pro Unternehmen oder im Internet als Ganzes oder auch
- die Anzahl von Bildern, die eine Privatperson im Laufe des Jahres produziert.

1.1.1 Warum Exponentialgesetze? Das Beispiel der Entwicklung der mobilen Kommunikation

Die innere Logik des exponentiellen Wachstums („je mehr man kann, desto mehr gewinnt man“) in der IT zeigt auch diese kausale Kette beim Fortschritt der drahtlosen Kommunikationstechnik sowohl in der Fernkommunikation (mit den Generationen der Mobilkommunikation) als auch im lokalen oder metropolitanen Bereich mit Verfahren wie WLAN, WiMAX und dem radarähnlichen UWB, aber auch bei den Chips für die satellitengestützte Ortsbestimmung mit GPS und dem eventuellen zukünftigen System Galileo:

1. Verkleinerung der Transistordimension reduziert den Strombedarf und
2. reduziert die relativen Produktionskosten (pro Schaltkreis) und
3. erhöht die Arbeitsfrequenz.

Damit werden

4. mobile Anwendungen möglich oder intelligenter,
und da sie preiswerter angeboten werden können gibt es weiter
5. einen „Rebound-Effekt“, wachsende Stückzahlen durch die neuen Möglichkeiten bei niedrigerem Preis.

Die wachsenden Stückzahlen reduzieren ihrerseits durch die „Lernkurve“ die Erstellungskosten weiter. Dies zeigen insbesondere die Schlüsselzahlen bei mobilen Telefonen („Handys“): Getrieben durch Technik, Wirtschaft und den globalen sozialen Impe-

tus der Mobilität gibt es heute etwa 2,7 Milliarden mobile Telefone, pro Jahr werden etwa 1 Milliarde weitere Telefone produziert und der Preis für die Grundfunktionen des mobilen Telefons wird weiter sinken (und damit der des preiswertesten verfügbaren Computers!).

Doch die Aufwärtsspirale (der „Virtuous Circle“) dreht sich weiter:

Höhere Arbeitsfrequenzen auf handelsüblichen Computerchips (sog. CMOS-Chips) ermöglichen unmittelbar höhere Datenraten und Bandbreiten: Normale Computerchips können damit die Funktionen von bisheriger teurer Speziallogik übernehmen, etwa von Gallium-Arsenid-Technologie, die bisher für Höchstgeschwindigkeitselektronik eingesetzt wurde. Immer mehr Kommunikationsfunktionen wandern nahezu kostenlos in den Prozessorteil des Chips (man sagt, auch beim mobilen Telefon, „des Radios“), auch der teure Analogteil der Kommunikation um die Antenne wird immer kleiner. Dadurch sinken (wie gehabt oder noch einmal) die Kosten, mehr Intelligenz steht zur Verfügung – und es gibt wieder den „Rebound“-Effekt mit neuen Massenanwendungen wie WLAN oder GPS in vielen mobilen Geräten!

Die Aufwärtsspirale kann weitergehen, solange Technik, Wirtschaft und Potenzial zusammenpassen; für das Wachstum der Mobiltelefonie, die im Wesentlichen durch die Weltbevölkerung begrenzt wird, gilt dies sicher für noch die nächsten 5 Jahre.

Die Geschwindigkeit des Fortschreitens der Entwicklung der IT ermöglicht einen besonderen technisch-sozialen Effekt, das Leapfrogging (Überspringen einer Technologie), insbesondere in der Kommunikationsinfrastruktur. Die konventionelle Infrastruktur in Europa wie in den USA beruht historisch auf festen Leitungen und festen Anschlüssen für die berühmte „letzte Meile“. In vielen Ländern der sich entwickelnden Welt bleibt die Menge der festen Leitungen auf eine kleine Oberschicht und einige staatliche Institutionen beschränkt. Die mobile Infrastruktur übernimmt die Hauptlast der Kommunikation. Im schmalbandigen Bereich ist dies mit dem mobilen Telefon in vollem Gange, im breitbandigen Zugang kann man hier den Trend zu WiMax-Netzen erwarten: Mit Netzen nach diesem neuen Standard lassen sich auch über metropolitane Entfernungen wie etwa 50 km Verbindungen mit bis zu etwa 100 Mbit/s etablieren. Damit lassen sich selbst kleinere Rechenzentren anbinden!

Ganz andere moderne Derivate der Moore'schen Beziehung von grosser Bedeutung sind die sogenannten Carlson-Kurven in der Biotechnik: Das Wachstum der Leistungsfähigkeit biotechnischer und bioinformatischer Prozesse wie das Sequencing von Genen und analog das Wachstum synthetischer biologischer Strukturen folgt ganz ähnlichen Exponentialbeziehungen mit dem Moore'schen Gesetz als Mitverursacher.

In der IT war die bisherige Konsequenz alle 10–15 Jahre ein Paradigmenwechsel: vom Batchbetrieb (Stapelbetrieb) und Glasshouse-Rechenzentren über Client-Server-Archi-

tekturen (im Wesentlichen der PC-Ära) zu Pervasive Computing (Computing überall). Und mit jedem Paradigmenwechsel ist die Informationstechnologie tiefer in die Gesellschaft eingedrungen!

Seit Malthus 1798 seine Bevölkerungstheorie aufgestellt hat, ist es klar, dass kein exponentielles Wachstum unbegrenzt lange andauern kann. Schön wird dies durch die Fabel vom Schachbrett und den Reiskörnern illustriert: Ein Korn auf das erste Feld gelegt, zwei auf das zweite, vier auf das dritte usw. Die unschuldige geometrische Reihe überschreitet nach etwa 46 Feldern die globale Reisernte! Allerdings: Schon seit einigen Jahren werden von der elektronischen Industrie mehr Transistoren produziert als von der Landwirtschaft der Welt Reiskörner!

1.1.2 Exponentialgesetz und „Redshift“-Systeme

Das exponentielle Wachstum betrifft auch die Computersysteme als Ganzes, aber nicht gleichmässig. Als Ganzes ist auch das Internet als globale Infrastruktur exponentiell gewachsen – dies liess sich am Wachstum der Internetserver und der Websites ablesen und ganz drastisch am Ausgehen der physikalischen Internetadressen im jetzigen Internet Version 4. Dadurch entstand der Zwang zum Übergang zur nächsten technischen Stufe, dem Internet Version 6 mit 2^{128} oder $3,4 \cdot 10^{38}$ Adressen, genügend für etwa $6,6 \cdot 10^{21}$ Adressen pro Quadratmeter Erdoberfläche.

Das Web mit dem weltweiten Einzugsgebiet und Potenzial ermöglicht damit Unternehmen, die die geeignete Geschäftsidee haben, für einige Jahre zumindest sogar schneller zu wachsen als nach dem Moore'schen Gesetz die IT allgemein. Beispiele hierzu sind Systeme wie Amazon, eBay, Google oder YouTube. Dieses Wachstum ist im Einklang mit der Aussage des Gilder'schen Paradigmas (George Gilder, 1996), das wir unten erläutern werden: Es sagt aus, dass die Systeme durch die Ressource bestimmt werden, die nur sehr begrenzt zur Verfügung steht. In der letzten Dekade war die Bandbreite des Internets, insbesondere der Zugang oder „die letzte bzw. erste Meile“ limitierend und damit ausschlaggebend für Client-Server-Architekturen und „fette“ Klienten, d.h. PCs mit umfangreichen lokalen Anwendungsprogrammen. Nun steht Bandbreite wenigstens in der entwickelten Welt zur Verfügung, sogar für massvolle Videodatenströme mit ihren höheren Ansprüchen.

Damit können erfolgreiche IT-Systeme exponentiell an den Grenzen der technischen Möglichkeiten wachsen, sie werden für ihre Anwendung – Buchhandel, Informationssuche, Geschäftsnetze, Privathandel oder Videobibliothek –, zu den zentralen „Hubs“ der Welt. Es ist eine Wiederkehr grosser zentraler Systeme in grösstem Massstab als „Rising Stars“: Greg Papadopoulos (Richard Martin, 2007) hat diese Kategorie von viralen Anwendungssystemen mit einem anderen astronomischen Begriff belegt:

„Redshift“-Systeme nach der astronomischen Rotverschiebung der entferntesten Galaxien. Während die Computersysteme klassischer Unternehmen, etwa einer Bank, typischerweise mit der Gesamtindustrie wachsen, wachsen bei länger anhaltendem lawinenartigen Erfolg diese „Redshift“-Systeme zu globalen Supersystemen, sowohl im Umfang ihrer Hardware als auch in Bezug auf die Anzahl der Benutzer. Dieser Trend ist dabei, die IT-Welt zu verändern. Es ist eine kuriose Wiederkehr des Grundgedankens des IT-historischen Lehrsatzes von Herbert Grosch (Gesetz von Grosch, 1953) aus der Zeit der dominierenden Mainframes: Die Leistungsfähigkeit von Computerhardware steige mit dem Quadrat des Preises. Der PC hatte die Kostenstruktur zu Gunsten von verteilten Anwendungen umgestossen. Heute ist es aber die Businesssebene, die grosse Systeme favorisiert, die als logisch zentralisierte Supersysteme einen ganzen globalen Marktbereich übernehmen: logisch zentral, physikalisch als verteilte Wolken (Clouds) von Tausenden von Servern in Computerfarmen.

Diese supererfolgreichen „Redshift“-Unternehmen haben einen extremen Einfluss auf die Weltwirtschaft und unsere Weltgesellschaft als Ganzes: Sie übernehmen als Supersysteme etwa wie

- Google – das faktische Wissen,
- eBay – den Handel mit Gütern,
- Amazon – den Handel mit Büchern,
- Bharti – die mobile Telefonie in Indien bzw. der Dritten Welt usf.

Die Suchmaschine Google als „Redshift“-Unternehmen zum Beispiel ist zum einen der wichtigste Lieferant von faktischem Wissen geworden, vom Schüler bis zum Journalisten. Zum anderen ist Google eine perfekte kommerzielle Handelsmaschine für Fakten zu Mikropreisen „pro Klick“ (im Wesentlichen zu zahlen vom Anbieter der Information). Das Ergebnis von Nachfragen wird aus der Infrastruktur des Google-Systems durch eingebaute oder bezahlte Regeln erzeugt: Die zugehörige Infrastruktur besteht vermutlich aus den weltweit grössten Computerfarmen der Welt – „vermutlich“, denn Details der Infrastruktur von Google sind nicht publiziert, sondern werden als Teil der Kernkompetenz des Unternehmens betrachtet (George Gilder schätzt 2006 für Google beispielsweise etwa 200 Petabytes Plattenspeicher und etwa 450'000 Server).

Bharti Indien ist ein Beispiel für ein derartig wachsendes nationales Unternehmen in einer „Redshift“-Industrie, der mobilen Kommunikation in den sich entwickelnden Ländern. Innerhalb von drei Jahren stieg die Kundenzahl von 7 auf 40 Millionen Kunden. In diesem Fall war dieses extreme Wachstum nur möglich durch radikales Outsourcing der notwendigen IT-Aufgaben an ein Unternehmen mit umfassender Kapazität.

1.1.3 Moore'sches Gesetz und Evolution

Bis jetzt hat das Moore'sche Gesetz „gewirkt“ im Zusammenspiel von Technologie und Markt. Die Technologie stellt in Hardware- und Systemdesign weiter die Grundlagen für technisches Wachstum zur Verfügung!

Von einigen Philosophen wird die Entwicklung der Chipstechnologie sogar in eine Reihe gestellt mit der Evolution des Menschen. Der Begriff „Singularität“ wird von Futurologen wie Ray Kurzweil (Ray Kurzweil, 2006) verwendet als Ausdruck für die spezielle Situation in der Technologie- und in der Menschheitsgeschichte, in der die exponentiell wachsende Computerleistung die Welt verändert, ein globales Nervensystem schafft oder den Computer sogar als Science-Fiction-Konzept mit uns körperlich zusammenarbeiten lässt, etwa über implantierte Chips oder eine Schnittstelle zum Gehirn (Brain Computer Interface BCI).

1.2 Aktuelle Aufgaben in der Chipstechnologie und das Problem des Stromverbrauchs

Der weitere Fortschritt in der Computertechnik kann nur zum kleinen Teil mit weiterer Verkleinerung der Bauelemente erreicht werden. In der Tat nähert man sich in heutiger Siliziumtechnologie (komplementäre Metalloxid-Halbleitertechnologie oder CMOS) atomaren Grenzen: Chipstechnologie ist bereits Nanotechnologie. Etwa ein Dutzend technischer und physikalischer Massnahmen sind zurzeit in der Planung bei Chipunternehmen wie AMD, IBM und Intel, die die Leistungsfähigkeit der Chips weiter erhöhen oder die Herstellbarkeit der Strukturen erleichtern.

Beispiele hierfür sind etwa

- „High K“: neue Materialien mit hohem K-Wert (Dielektrizitätskonstante) auf dem Chip, die Siliziumdioxid als Transistortrennschicht ersetzen und dabei mehr elektrische Ladung speichern und weniger Leckströme durchlassen: z.B. Hafniumdioxid (Abb. 1-2a im Bilderanhang),
- „Strained Silicon“: Silizium mit verspanntem Kristallgitter, das die Beweglichkeit der Elektronen erhöht,
- „AirGap“: Vakuubläschen als Isolation um die kilometerlangen Leitungen auf einem Chip, die die Verluste verringern (Abb. 1-2b im Anhang),
- „3D-Chip-Stacking“: vertikal übereinander gestapelte und direkt verbundene Chips, die die Länge der Verbindungsleitungen drastisch verkürzen,