

Rolf Drechsler · Andrea Fink
Jannis Stoppe

Computer

Wie funktionieren
Smartphone,
Tablet & Co.?



Springer

Technik im Fokus

Weitere Bände zur Reihe finden Sie unter
<http://www.springer.com/series/8887>.

Rolf Drechsler · Andrea Fink ·
Jannis Stoppe

Computer

Wie funktionieren Smartphone, Tablet
& Co.?

 Springer

Rolf Drechsler
Universität Bremen / DFKI GmbH
Bremen, Deutschland

Jannis Stoppe
Universität Bremen / DFKI GmbH
Bremen, Deutschland

Andrea Fink
Bremen, Deutschland

ISSN 2194-0770

Technik im Fokus

ISBN 978-3-662-53059-7

DOI 10.1007/978-3-662-53060-3

ISSN 2194-0789 (electronic)

ISBN 978-3-662-53060-3 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Konzeption der Energie-Bände in der Reihe Technik im Fokus:

Prof. Dr.-Ing. Viktor Wesselak, Institut für Regenerative Energiesysteme, Hochschule Nordhausen

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Danksagung

Dieses Buch ist im Umfeld und mit der Unterstützung der von Prof. Dr. Rolf Drechsler geleiteten Arbeitsgruppe Rechnerarchitektur (AGRA) der Universität Bremen und des Forschungsbereichs Cyber-Physical Systems des Deutschen Forschungszentrums für Künstliche Intelligenz (DFKI) entstanden. Beide Einrichtungen beschäftigen sich seit Jahren intensiv mit dem Entwurf und der Entwurfsmethodik komplexer Schaltungen und Systeme.

Unser besonderer Dank gilt den folgenden Korrekturleserinnen und Korrekturlesern sowie Hinweisgeberinnen und Hinweisgebern: Fatma Akin, Monika Barth, Gunhilde Drechsler, Regina Fink, Dr. Carolin Fink, Dr. Cornelia Große, Martin Ring, Prof. Dr. Robert Wille. Für die Unterstützung bei der Erstellung der Videos bedanken wir uns bei der Stiftung der Universität Bremen und der Sparkasse Bremen. Darüber hinaus danken wir dem Springer-Verlag für die angenehme Zusammenarbeit.

Bremen, Januar 2017

Rolf Drechsler
Andrea Fink
Jannis Stoppe

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Alles ist logisch	5
	2.1 Was ist Logik?	6
	2.2 Computer und Logik	8
	2.3 Aussagenlogik	10
	2.4 Boolesche Algebra	11
	2.4.1 Boolesche Operatoren	12
	2.4.2 Regeln der Booleschen Algebra	19
	2.5 Des Rätsels Lösung	23
3	Die Hardware	27
	3.1 Von-Neumann-Architektur	28
	3.2 Transistoren	29
	3.3 Logik auf Hardwareebene	35
4	0 und 1 ist nicht genug	41
	4.1 Zahlensysteme	42
	4.2 Kodierung	44
	4.3 Fehlererkennung und -korrektur	50
5	Von der (Rechen-)Aufgabe zum Schaltplan	55
	5.1 Addition wie in der Schule	56
	5.2 Halbaddierer	58
	5.3 Volladdierer	61

5.4	Addierwerk	63
5.5	Logiksynthese	67
6	Wie sage ich es meinem Computer?	75
6.1	Programmiersprachen	77
6.1.1	Von der Maschinensprache zum Assemblercode	79
6.1.2	Höhere Programmiersprachen	86
6.1.3	Von der Hochsprache zur Maschinensprache	91
7	Der Rechnerarchitekt	97
7.1	Die Anforderungsspezifikation	99
7.2	Was wird Hardware, was wird Software?	101
7.3	Optimierung auf Hardwareebene	104
7.3.1	Rechnerklassifikation nach Flynn	105
7.3.2	Pipeline-Architektur	107
7.3.3	Speicherhierarchie	111
8	Wohin die Reise geht: aktuelle Entwicklungen und visionäre Konzepte	115
8.1	More than Moore: Mehr Funktionalität auf kleinstem Raum	116
8.2	Computer von übermorgen: Quanten oder DNA?	118
8.2.1	Quantencomputer	118
8.2.2	DNA-Computer	120
9	Zu guter Letzt	123
	Sachverzeichnis	125

Technischer Fortschritt verändert unsere Welt, permanent. Was gestern modern war, wird heute in Frage gestellt, ist morgen von vorgestern und übermorgen bestenfalls Nostalgie. Immer neue technische Systeme sollen uns in immer kürzeren Abständen das Leben einfacher, komfortabler und unterhaltsamer gestalten. So wächst jede Generation mit ganz unterschiedlichen Technologien auf, und die Vielfalt wird immer größer: vom Plattenspieler, der heute ein Revival feiert, über den Kassettenrecorder, der auf dem Dachboden verstaubt, den tragbaren Walkman, welcher vom portablen CD-Player abgelöst wurde, und der wiederum dem MP3-Player weichen musste bis hin zu den Computersystemen von heute, bei denen das Abspielen von Musik nur noch eine von unzähligen weiteren Funktionen ist.

Computer haben in den letzten Jahrzehnten nicht nur die Art und Weise des Musikhörens neu definiert, sondern nahezu alle Bereiche unseres Lebens erobert und viele davon tiefgreifend verändert. Dabei wurden die Geräte immer kleiner und leistungsstärker, was nicht zuletzt dazu führte, dass Computersysteme sowohl in unserem Alltag als auch in unserer Arbeitswelt heute allgegenwärtig sind. Internet und Mobiltelefon sind längst zu selbstverständlichen Begleitern geworden, mit denen wir jederzeit und überall erreichbar sind und auf das digitalisierte Wissen der Welt zugreifen können. SMS, E-Mail, sogenanntes Instant-Messaging über Skype oder WhatsApp und der Austausch in sozialen Netzwerken stellen für viele heute einen wichtigen Teil ihrer Alltagskommunikation

und Beziehungspflege dar. Überdies nutzen wir Computer völlig unbewusst, denn sie befinden sich – oft unsichtbar – in zahlreichen Geräten unseres täglichen Lebens, zum Beispiel in Autos, Aufzügen, Verkehrsampeln oder Haushaltsgeräten.

Auch das Wirtschaftssystem hat sich in den vergangenen Jahren grundlegend gewandelt: Modernste Informations- und Kommunikationstechnologien halten Einzug in die industrielle Produktion. Roboter und andere Computersysteme übernehmen unliebsame, monotone oder gefährliche Aufgaben und unterstützen den Menschen bei der Arbeit, zum Beispiel indem sie ihm immer genau das Werkzeug oder exakt die Information zur Verfügung stellen, das bzw. die er gerade benötigt. Vor allem in der Wissenschaft sind digitale Technologien heute unverzichtbar, denn sie ermöglichen einen Erkenntnisgewinn, der ohne sie schlichtweg unmöglich wäre, etwa bei der Vorhersage von Klimaveränderungen, der Simulation der Wirkung neuer Medikamente auf den Organismus oder der Suche nach winzigen Elementarteilchen.

Trotz der unbestritten großen Bedeutung von Computertechnologien in unserer Gesellschaft und ihres enormen Potenzials tiefgreifende Veränderungen herbeizuführen, ist das Wissen um die Funktionsweise moderner Rechner unter den Nutzerinnen und Nutzern vergleichsweise gering. Das mag zum einen an der Komplexität heutiger Systeme liegen, die die Laien bzw. den Laien eher davor zurückschrecken lässt, sich näher damit auseinander zu setzen, zum anderen schlicht und einfach daran, dass dieses Verständnis nicht unbedingt notwendig ist, um einen Rechner bedienen und nutzen zu können. Doch gerade in der heutigen Zeit, in der wir fast rund um die Uhr und in allen Lebenslagen von Computern umgeben sind und es zunehmend Debatten nicht nur über die Vorteile, sondern auch um die potentiell negativen Seiten dieser Entwicklung gibt, lohnt sich ein Blick hinter das schützende Gehäuse hinein in den Rechner. Dabei sind Computersysteme heute längst nicht mehr nur klassische Schreibtisch-PCs mit Monitor, Maus und Tastatur – auch wenn viele sicherlich genau das immer noch vor Augen haben, wenn sie sich einen Rechner vorstellen. Das Herzstück eines Computers, der sogenannte Prozessor, befindet sich vielmehr auf einem winzig kleinen Chip, der zusammen mit vielen weiteren Komponenten auf einer Platine aufgebracht ist, die wiederum in Tablets, Smartphones, Waschmaschinen und vielen anderen Geräten stecken kann.

Was es alles braucht, um die Funktionsweise heutiger Computer zu verstehen, erfahren Sie in den folgenden Kapiteln dieses Buches. Trotz ihrer Komplexität und Vielfalt ist das Grundprinzip, nach dem moderne Rechner arbeiten, stets dasselbe. Eine fundamentale Rolle spielt dabei die Logik, auf der alle Computersysteme basieren. Dank ihr sind wir in der Lage, aus einfachen logischen Verknüpfungen komplexere Funktionen zusammenzusetzen. Solche Verknüpfungen sind durch bestimmte Bauteile, die sogenannte Hardware, technisch realisierbar. Bevor diese Systeme allerdings Informationen verarbeiten können, muss der Inhalt zunächst kodiert werden, und zwar in 0en und 1en, die Sprache der Computer. Mithilfe der logischen Verknüpfungen lassen sich schließlich Berechnungen durchführen und Schaltpläne für ganz konkrete Anwendungen erstellen. Programmiersprachen dienen dazu, dem Rechner präzise Anweisungen zu geben, ihm also genau zu sagen, was er tun soll. Für den Entwurf ganzer Computersysteme ist dann der Rechnerarchitekt zuständig, der über das Zusammenspiel aller Rechnerkomponenten entscheidet. Die Computertechnik hat sich in den letzten Jahrzehnten in einem beispiellosen Tempo entwickelt. Doch wohin geht die Reise?

Ohne größeres technisches und informatisches Vorwissen vorauszusetzen, beschreibt das vorliegende Buch auf verständliche, informative und unterhaltsame Weise den Aufbau und die grundlegende Arbeitsweise moderner Rechner – angereichert mit zahlreichen Illustrationen und ergänzt durch Links zu kurzen Web-Videos, in denen der Informatiker Professor Rolf Drechsler einzelne Themen prägnant und pointiert erklärt. Dabei erhebt das Buch keinerlei Anspruch auf inhaltliche Vollständigkeit und verzichtet zugunsten der Verständlichkeit auf umfangreiche und detaillierte Erläuterungen. Stattdessen sollen viele praktische Beispiele und Alltagsbezüge das Thema für die Leserinnen und Leser veranschaulichen und Lust machen, sich weitergehend damit zu beschäftigen.

Zu Beginn ein kleines Rätsel¹:

Andreas, Benjamin und Clemens stehen vor Gericht, aber nur einer von ihnen ist schuldig.

Andreas behauptet, unschuldig zu sein.

Benjamin bestätigt, dass Andreas unschuldig ist.

Clemens behauptet schließlich, selbst schuldig zu sein.

Im Verlauf des Gerichtsverfahrens stellt sich heraus, dass der Schuldige gelogen hat. Wer ist der Schuldige?

Sie wissen die Antwort bereits? Prima. Wenn nicht, so macht das auch nichts. In diesem Kapitel lernen Sie die notwendigen „Werkzeuge“ kennen, mit denen Sie sich die Antwort selbst herleiten können.

¹ Frei nach Smullyan, Raymond (1997): The Riddle of Scheherazade. Alfred A. Knopf, New York.



2.1 Was ist Logik?

Um dieses Rätsel zu lösen, müssen Sie logisch denken. Klingt einfach? Ist es aber nicht unbedingt. Wie oft sagen wir im Alltag „Ist doch logisch!“. Doch die Logik ist eine Kunst, die ein Um-die-Ecke-Denken erfordert, ein Verstehen von Zusammenhängen, die auf den ersten Blick nicht immer ersichtlich sind. Die digitale Ausgabe des Dudens definiert Logik als die „Lehre vom folgerichtigen Denken, vom Schließen aufgrund gegebener Aussagen“². Es geht also darum, Aussagen auf ihre Gültigkeit hin zu überprüfen und daraus die richtigen Schlüsse zu ziehen. Und wer war der erste logische Denker? Na wer wohl? Aristoteles na-

² <http://www.duden.de/rechtschreibung/Logik>, Zugriff am 20.11.2015.

türlich, der alte Alleskönner. Er entwickelte die Syllogistik, ein System, nachdem aus zwei Aussagen auf eine dritte geschlossen wurde. Ein klassisches Beispiel: Aus den Aussagen „Alle Menschen sind sterblich“ und „Alle Griechen sind Menschen“ lässt sich logisch schlussfolgern, dass alle Griechen sterblich sind. So einfach ist es aber nicht immer. Manchmal verführt uns unsere Intuition zu Schlüssen, die sich beim genaueren Hinsehen als falsch herausstellen. Nur weil ich auf meine Gesundheit achte und Obst gesund ist, heißt das nicht automatisch, dass ich auch regelmäßig Obst esse. Möglicherweise mag ich gar kein Obst und esse stattdessen viel Gemüse, oder eine Fructose-Intoleranz zwingt mich dazu, auf Apfel und Co. zu verzichten. Mit voreiligen Schlüssen hat Logik also nichts zu tun – kein Wunder, schließlich ist sie von jeher eng mit der Philosophie verbunden.

Im 19. Jahrhundert fand die Logik zunehmend Eingang in die Mathematik, und zwar als eine Sprache, die sich dank ihrer Eindeutigkeit – entweder eine Aussage ist wahr oder sie ist falsch – perfekt dafür eignet, mathematische Sätze zu formulieren und Beweise zu führen. Der Engländer George Boole (1815–1864) beschrieb in seinem Hauptwerk „The Mathematical Analysis of Logic“ von 1847 den ersten algebraischen Logikkalkül, ein formales Regelsystem, das vorgibt, wie sich aus gegebenen Aussagen weitere Aussagen ableiten lassen. Damit gilt Boole als einer der Begründer der modernen mathematischen Logik.

Aber Halt! Was hat das denn alles mit dem Computer zu tun?

Als Lehre des richtigen Schlussfolgerns ist die Logik nicht nur die Sprache der Mathematik, sondern auch der Computertechnik. Der richtige Umgang mit logischen Ausdrücken ist der Schlüssel, um zu verstehen, wie moderne Computer funktionieren.