

Im November 1994 – nur 8 Jahre nach Tschernobyl – war es soweit, auch die Computerindustrie hatte ihren ersten Super-GAU, den „größten anzunehmenden Unfall“. Es erwischte Intel voll. Intel ist die Nr.1 unter den Chip-Herstellern und besitzt einen Weltmarktanteil von 80 %.

Intel hat sich einen eklatanten Design-Fehler ihres vielgepriesenen Pentium-Mikroprozessors geleistet [4, 8]. Seit 1993 haben sie ca. 6 Millionen Chips mit einem eingebauten Divisionsfehler verkauft, ohne es zunächst selbst zu bemerken. Der Skandal war vollends da, als Intel nur die Chips von ausgesuchten Anwendern aufgrund eines Interviews ersetzen wollte.

In welcher Not sich Intel nun befindet, zeigt z.B. auch die Tatsache, daß sie sich am 1. Dezember 1994 weltweit eine (interne) Telefon-Konferenz schalten ließ, um so schnell über Software-Zwischenlösungen mit unabhängigen PC-Hard- und Software-Experten, die in den letzten Wochen durch ihre kompetenten Veröffentlichungen und Testprogramme im Internet bekannt geworden waren, zu diskutieren [9]. Waren sie mit ihrem Latein am Ende?

In Erklärungen hat Intel zwar den Fehler zugegeben, ihn aber immer verniedlicht (siehe Kasten in [8]) und die Kunden zunächst überhaupt nicht und dann erst Ende

November 1994, als es nicht mehr anders ging, über die Auswirkungen des Fehlers völlig falsch informiert [5]. Intel „is lying“, kommentierte das Internet kurz und knapp und sprach bereits von einem „Intelgate“.

Im folgenden wird deshalb versucht, einen bescheidenen Beitrag zur rationalen Darstellung des Ausmaßes und -wirkung des Pentium-Defekts zu leisten.

Alle numerischen Berechnungen wurden auf einem zuverlässigen PowerMacintosh ausgeführt, der mit dem Motorola PowerPC-Chip 601 ausgestattet ist. Für die Analysen wurde außerdem das hochgenaue Mathematica der Firma Wolfram Research, Champaign (USA) verwendet.

1. Was ist der Fehler?

Der Hardware-Fehler liegt im Gleitkomma-prozessor des Pentium-Chips. Intel hat hier schlichtweg einige Dutzend Transistoren vergessen [6]. Dieses führt dazu, daß der Maschinenbefehl FDIV, also die Gleitkommadi- vision nicht in allen Fällen korrekt ausgeführt wird. Betroffen sind davon nur bestimmte Zahlenpaare, die aber bisher nicht alle be- kannt sind. Intel hat diese bisher nicht mit- geteilt. Im Internet sind bisher von unabhän- gigen Experten 1738 kritische Zahlenpaare mitgeteilt worden. Es werden aber mit Si- cherheit noch viel mehr sein (siehe Punkt 2).

Intels offizielle Information suggeriert aber, daß es sich um einen zu vernachlässigen- den, zufällig auftretenden Fehler handelt [4, 8]. Das trifft nicht zu. Bei jedem der Zahlen- paare wird die Division immer gleich falsch berechnet und das auf jedem Pentium.

»Intel inside – can't divide!«

Spottet das Internet.

Ein Beispiel: Mit den Zahlen $x=4195835,0$ und $y=3145727,0$ ergibt die Berechnung von z auf einem Pentium-PC nach der folgenden Formel

$$z = x - \left(\frac{x}{y}\right) \cdot y \quad (1)$$

$z=256,0$ und nicht das richtige $z=0,0$. Die Ursache für das falsche Ergebnis liegt in der Division von x/y , die in diesem Beispiel bereits ab dem 5. Digit falsch berechnet wird. Unter Digits versteht man alle Ziffern einer Zahl, egal ob sie vor oder nach dem Komma stehen. Intel suggeriert allerdings der Öffent- lichkeit, und die wenig sachkundige Presse hat das gerne aufgegriffen [6, 7], daß ein Fehler erst ab der 9. Stelle nach dem Komma auftritt [5] und damit unbedeutend sei. Exper- ten haben inzwischen gezeigt, daß sogar bei einigen Zahlenpaaren das 4. Digit falsch wird.

Der Fehler hat auch ein Gesicht. Stellt man die Funktion $Q(x,y) = x/y$ in der Nähe eines der kritischen Zahlenpaare (magic numbers) als 3D-Plot dar, erkennt man dreieckige Lö- cher in der Oberfläche Q (Abb. 1). Für einen makellosen Computer ist die Fläche Q mono- ton glatt und weist keinerlei Löcher auf, in die z.B. ein ahnungsloser Wissenschaftler bei der Auswertung seiner Daten auf einem Intel Pentium-PC hineinfallen könnte.

2. Kritische Zahlenpaare:

Gleitkommazahlen werden durch die An- gabe einer Mantisse mmm und eines Expo- nenten exp in der Form $1,mmm... \cdot 2^{exp}$ dar- gestellt. Der Divisionsfehler betrifft nur die Mantissendarstellung. Für die Mantisse mit einfacher Genauigkeit (etwa 7 dezimale Di- gits) stehen 23 Bit zur binären Darstellung zur Verfügung, bei doppelter Genauigkeit (etwa 15 dezimale Digits) sind es 52 Bit.

Betrachtet man nur die Gleitkommazahlen einfacher Genauigkeit, dann lassen sich auf einem Pentium $N=2^{23}$ verschiedene Mantis- sen darstellen. Da der Exponent nicht von dem Fehler betroffen ist, ergeben sich somit insgesamt

$$M = N \cdot N = 2^{23} \cdot 2^{23} = 2^{46} \approx 70 \cdot 10^{12} \quad (2)$$

Divisionsmöglichkeiten. Einige dieser Zahlen- paare, die ein bestimmtes Bitmuster in der Mantisse aufweisen [1], ergeben ein falsches Resultat.

Intel behauptet nun, daß ein kritisches Zahlenpaar auf 9 Milliarden der M Zahlen- paare kommt [5].

$$p = 1 / 9 \cdot 10^9 \quad (3)$$

Damit läßt sich die Anzahl der kritischen Mantissenpaare abschätzen mit

$$M_{krit} \geq M \cdot p = M / 9 \cdot 10^9 \approx 7819 \quad (4)$$

Da alle mit 2er-Potenzen multiplizierten Zahlenpaare ebenfalls kritische Zahlenpaare sind (sie haben die gleichen Mantissen), ist die Gesamtanzahl aller kritischen Zahlen- paare gleich M_{krit} multipliziert mit der Anzahl der möglichen Exponenten, also noch we- sentlich höher als (4).

3. Häufigkeit des Fehlers:

Die von Intel so vehement propagierte Wahr- scheinlichkeitsbetrachtung [4, 11] ist fragwürdig und führt auch völlig in die Irre. Denn es gibt natürlich kein statistisches Mo- dell der Häufigkeiten des Auftretens von kri- tischen Divisionen über alle auf dem Markt erhältlichen PC-Programme.

Führt man die Anzahl von pro Sekunde ausgeführten FDIV-Befehlen d ein, und be- trachtet die Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(t)$ des Nicht-Auftretens eines Fehlers in t aufeinanderfolgenden Sekunden

$$P(t) = (1 - p)^{d \cdot t}, \quad (5)$$

dann läßt sich eine interessante Abschät-

Der Pentium Fehler

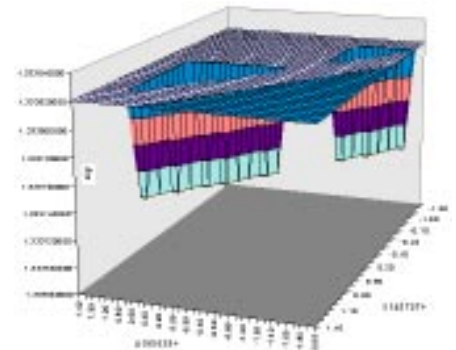


Abb. 1: Darstellung der Quotientenfunktion $Q(x,y) = x/y$ in der Umgebung des kritischen Zahlenpaares $x=4195835,0$ und $y=3145727,0$. Ein Schweizer Käse mit dreieckigen Löchern. Nach dem Fehler-Modell von Tim Coe [1] berechnet.

Will wonders never cease

This is a news flash from the world of quantum mechanics.

A new fundamental law of the physical universe, called the "Intel uncertainty principle," has shaken the very foundations of modern physics.

Briefly, the principle works something like this. Give any floating point division x/y on an Intel Pentium chip, you can either know the exact values x and y , or you can know the exact value of the quotient x/y , but it is impossible on a Pentium to know the precise values of x , y and x/y .

A wave function $P_m(x, y)$ – an irrational solution of the Grove equation (Andy Grove was the former president of the former chip manufacturer Intel) – describes the probability of finding the correct solution. Thus the new view modern physics is taking is that all floating point operations are probability wave functions.

Similarly, the newly discovered P.C. exclusion principle prohibits replacement chips from ever occupying the same orbital as the original chip, thus effectively making such replacement impossible.

1. Dec. 1994 Jacobson, Ohio & khd

zung vornehmen. Der FDIV-Befehl selbst benötigt zur Ausführung 39 Maschinenzyklen. In einer typischen Programmschleife, die z. B. $n = 72$ Zyklen benötigt, sei ein FDIV-Befehl enthalten. Dann berechnet sich das d für einen mit $f = 90$ MHz getakteten Pentium zu

$$d = f / n = 90 \cdot 10^6 \text{ Zyk/s} / 72 \text{ Zyk/FDIV} = 1.250.000 \text{ FDIV/s} \quad (6)$$

Löst man (5) nach t auf, erhält man die Zeit t bis zum Auftreten des ersten Divisionsfehlers mit

$$t = \frac{\log(P)}{d \cdot \log(1-p)} \quad (7)$$

Mit der Wahrscheinlichkeit $P = 0,5$ (50%) ergibt sich für das Beispiel

$$t = 5545,2 \text{ s} = 92,4 \text{ min} \quad (8)$$

Das sind also nur rund 1 1/2 Stunden. Die mittlere Zeit t_m zwischen dem Auftreten von Divisionsfehlern berechnet sich zu

$$t_m = 1 / p \cdot d \approx 7200 \text{ s} = 120 \text{ min} = 2 \text{ h} \quad (9)$$

Also bereits alle zwei Stunden kann man bei der Ausführung einer solchen Programmschleife einen Fehler erwarten. Sicher, dieses Beispiel mag einen (auch für Intel) ungünstigen Fall darstellen. Aber so geht man nun einmal wissenschaftlich an die Dinge heran. Intel erzählt hingegen der Öffentlichkeit, daß ein normaler Benutzer (wer ist das?) den Divisionsfehler nur einmal alle 27.000 Jahre erleben würde [5, 8]. –

Da die PC-Welt nun schon seit Jahren das „Plug & Play“ nicht packt, kam schließlich Intels Antwort: „Bug & Pay“!

Available for the Intel Pentium only. (Internet)

4. Kritische Algorithmen:

In sehr vielen Programmen können Algorithmen vorkommen, die besonders anfällig für Fehlrechnungen aufgrund des Pentium-Defekts sind. Dazu gehören zum Beispiel:

■ **Iterative Algorithmen:** Solche werden u.a. auch beim Berechnen von hochgenauen Curvetfits verwendet. Diese Berechnungen können sogar ganz versagen, weil sich z. B. eine große Daten-Matrix nicht mehr einwandfrei invertieren läßt oder ein Abbruchkriterium nie korrekt berechnet wird und daher eine Verzweigung dann in die falsche Richtung läuft. Dafür ein Beispiel mit $a = 4,999999$ und $x_i = 15$ und der vorangegangenen Iteration $x_{i-1} = 14,999999$. Das Abbruchkriterium

$$a / x_i < a / x_{i-1} ? \quad (10)$$

wird auf jedem Computer mit *Ja* beantwortet, aber auf allen Intel Pentium mit *Nein*.

■ **Ketten-Algorithmen:** Rechenkettens, bei denen Zwischenergebnisse über viele Stufen in weitere Berechnungen mit Divisionen eingehen, sind besonders kritisch und können unkalkulierbare Konsequenzen haben. Der resultierende Fehler kann jede Größe annehmen, und ist nicht etwa nur auf das 4. bis 19. Digit beschränkt. Es gilt das Fehlerfortpflanzungsgesetz von Gauß.

■ **Finanztechnische Algorithmen:** Auch bei Zinsberechnungen, Kalkulationen von Kreditraten usw. kann sehr wohl der Pentium-Defekt zu falschen Ergebnissen führen. Denn immerhin liegen einige der gefundenen kritischen Zahlenpaare in Bereichen, die bei solchen Berechnungen durchaus vorkommen können. Dazu gehören z. B. die Divisoren 3, 9, 15, 21 und 27, jeweils um einen sehr kleinen Betrag verringert.

Man sollte Finanzberechnungen sowieso nie mit Gleitkommazahlen ausführen, sonst fehlt nachher in der Bilanz bestimmt ein Pfennig. Aber viele „normale Benutzer“ werden dazu eines der üblichen PC-Tabellenkalkulationsprogramme benutzen, und dann...

5. Wiss. Datenverarbeitung:

Jeder Wissenschaftler trägt selbst die Verantwortung für die Auswahl eines Computertyps, der den Anforderungen seiner jeweiligen Aufgabenstellung angemessen ist. Eines muß der Wissenschaftler aber können, sich 100%-ig auf die vom Computerhersteller zugesagten Leistungsmerkmale und die absolute Richtigkeit aller Rechenoperationen (Maschinenbefehle) verlassen.

Der fehlerhafte Intel Pentium ist für seriöse wissenschaftlichen Auswertungen, Datenanalysen und Berechnungen völlig unbrauchbar. Die mit Hilfe eines Intel Pentium-PCs bisher erzielten Resultate müssen vor einer Veröffentlichung durch erneute Berechnungen auf einer zuverlässigen Computerplattform überprüft werden [10].

Eines sollte jeder Wissenschaftler aus dem Pentium-Debakel auch gelernt haben: In jede Methodenbeschreibung einer wissenschaftlichen Publikation gehört selbstverständlich neben der Angabe der benutzten Software immer auch die Angabe des verwendeten Computertyps, und dieses sollte natürlich ein Computer mit hoher Zuverlässigkeit sein.

Im Internet wurde bereits ein Fall aus Holland bekannt, wo jetzt ein Verlag das Manuskript dem Autor zur Überprüfung der Ergebnisse zurückgeschickt hat, da im Text vermerkt war: „... were performed on a high-end PC containing an Intel Pentium-90 CPU.“

6. Sonstige Hinweise:

■ Intel hat ein „Weißbuch“ publiziert [11]. In diesem befindet sich u.a. ein Hinweis darauf, daß neben dem FDIV-Befehl auch andere Maschinenbefehle fehlerhaft sind. Zitat: „Since this divide operation is used by the Divide, Remaindering, and certain Transcendental Instructions (Anm.: Bestätigt sind inzwischen FPTAN, FPATAN und 9 weitere Befehle [5]), an inaccuracy introduced in the operation manifests itself as an inaccuracy in the results generated by these instructions.“

■ Nach Informationen des Wall Street Journals wird Intel frühestens im März 1995 defektfreie Pentium-Chips in größeren Stückzahlen liefern können. Solange werden Pentium-PCs noch mit den defekten Chips gebaut und natürlich auch verkauft!

7. Literatur:

Alle im folgenden aufgezählten Materialien sind auch elektronisch publiziert und stehen als Dateien (Files) auf dem Ftp-Server <ftp.grumed.fu-berlin.de> im Verzeichnis *PC* zum Kopieren via Internet (*Anonymous Ftp*) zur allgemeinen Verfügung. Auf diesem Ftp-Server sind noch weitere Infodateien zum Pentium-Defekt zu finden.

- [1] – [7] Literatur siehe wdv-notes Nr. 307 [8].
 [8] Dittberner, K.-H.: „Intel Pentium – The Chip that Redefines Mathematics“. FU Berlin (IfP): wdv-notes Nr. 307, 1994–1995.
 [9] Dittberner, K.-H. (Ed.): Suggestions for Pentium Bug Software Workarounds. – File: *PBUG_WORKAROUND.TXT*.
 [10] Informations and a Warning for Using SPSS on a Buggy Pentium. SPSS, 3. Dezember 1994. – File: *PBUG_SPSS.TXT*.

[11] Sharangpani, H. P. and Barton, M. L.: Statistical Analysis of Floating Point Flow in the Pentium Processor. Santa Clara (USA): Intel Corp. White Book, 30. November 1994. – File: *INTELS_WHITE_PAPER.PS*.

[12] Dittberner, K.-H. (Ed.): Niklaus Wirth über die Zukunft offener Systeme. FU Berlin (IfP): wdv-notes Nr. 196, 1991–1993.

Die Arroganz der Macht

Nun wissen wir es also ganz genau, ein Konzern meint bei einem Weltmarktanteil von 80% mit mündigen Kunden nach Belieben umspringen zu können, Hauptsache die Kasse stimmt. Intel hat einen Konstruktionsfehler des Pentium-Prozessors, der jeden Pentium-Computer unzuverlässig rechnen läßt, ein halbes Jahr verschwiegen und räumte den Defekt erst dann ein, als er von Anwendern gefunden und in der weltweiten Öffentlichkeit des Internets bekannt wurde. Nein Intel, das ist unglaublicher Machtmißbrauch der übelsten Sorte.

Es zeigt sich aber auch, wie wenig Sorgfalt Intel auf die Qualitätskontrolle ihrer vermeintlichen Hightech-Produkte verwendete. Das war zwar schon in den letzten Jahren zu beobachten, denn die Fehlerliste aller Intel-Chips ist inzwischen ellenlang, länger als die aller Hauptkonkurrenten zusammen.

Von Albert Einstein stammt der Grundsatz „Make it as simple as possible, but not simpler.“ Intel hat bei der Entwicklung des Pentium-Prozessors eklatant gegen dieses universelle Prinzip verstoßen. Sie machten den Pentium „as complex as possible“. Deshalb konnte Intel den Chip auch nicht einmal mehr vollständig testen, bevor sie ihn verkauften. Sie versprachen aber dennoch in der Werbung die absolute Perfektion („Quality you can count on!“). Und unkritische Ingenieure, die es eigentlich hätten besser wissen können, klatschten dazu auch noch Beifall. Es war der Schweizer Informatik-Professor Niklaus Wirth, der Erfinder von Modula-2, der immer wieder auch auf die Gefahren einer ungesunden Hightech-Entwicklung und deren Folgen hingewiesen hat [12]. Er hat recht behalten.

Der „Fall Intel“ lehrt uns aber auch noch etwas ganz anderes, das große Hoffnung macht. Die vielfach belächelte schnelle interkontinentale Hightech-Kommunikation per E-Mail und UseNet-News über das Internet (Information-Highway) hat eine erste große Bewährungsprobe bestanden. Sie ermöglichte – im zutiefst demokratischen Sinne – die sehr schnelle Herstellung von Öffentlichkeit.

Im „Fall Intel“ reagierten die Massenmedien weltweit viel zu träge und ungenau, als im November 1994 Internet-Benutzer in weltweiter Kooperation den Pentium-Defekt entdeckten, verifizierten, nochmals überprüften und dann höchsten Alarm gaben. –

Die Mächtigen auf dieser Erde werden es in Zukunft sehr viel schwerer haben, Wahrheiten zu verbergen. Liefert doch dieser Skandal inzwischen auch erste Anzeichen dafür, daß eine sehr schnell, solide und umfassend informierte (Welt-)Gesellschaft, einen erheblichen Einfluß darauf haben kann, daß z. B. die unethischen Geschäftspraktiken eines Weltkonzerns sich letztendlich doch nicht durchsetzen können. – khd