

Wolfgang K. Seiler

Zahlentheorie

Vorlesung an der Universität Mannheim
im Frühjahrssemester 2018

Dieses Skriptum entsteht parallel zur Vorlesung und soll mit möglichst geringer Verzögerung erscheinen. Es ist daher in seiner Qualität auf keinen Fall mit einem Lehrbuch zu vergleichen; insbesondere sind Fehler bei dieser Entstehungsweise nicht nur möglich, sondern **sicher**. Dabei handelt es sich wohl leider nicht immer nur um harmlose Tippfehler, sondern auch um Fehler bei den mathematischen Aussagen. Da mehrere Teile aus anderen Skripten für Hörerkreise der verschiedensten Niveaus übernommen sind, ist die Präsentation auch teilweise ziemlich inhomogen.

Das Skriptum sollte daher mit Sorgfalt und einem gewissen Mißtrauen gegen seinen Inhalt gelesen werden. Falls Sie Fehler finden, teilen Sie mir dies bitte persönlich oder per e-mail (seiler@math.uni-mannheim.de) mit. Auch wenn Sie Teile des Skriptums unverständlich finden, bin ich für entsprechende Hinweise dankbar.

Falls genügend viele Hinweise eingehen, werde ich von Zeit zu Zeit Listen mit Berichtigungen und Verbesserungen zusammenstellen. In der online Version werden natürlich alle bekannten Fehler korrigiert.

Biographische Angaben von Mathematikern beruhen größtenteils auf den entsprechenden Artikeln im *MacTutor History of Mathematics archive* (www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/history/), von wo auch die meisten abgedruckten Bilder stammen. Bei noch lebenden Mathematikern bezog ich mich, soweit möglich, auf deren eigenen Internetauftritt.

Kapitel 1

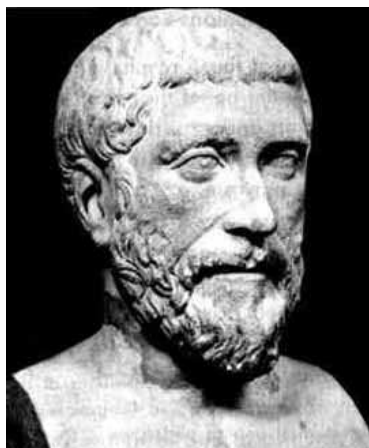
Ganze Zahlen und ihre Primzerlegung

§ 1: Rationale und irrationale Zahlen

Die Zahlentheorie beschäftigt sich, wie schon ihr Name sagt, mit Zahlen. Nun würde allerdings eine Umfrage wohl ergeben, daß sich nach Ansicht eines Großteils der Bevölkerung die gesamte Mathematik mit Zahlen beschäftigt – auch wenn beispielsweise im neunbändigen Analysislehrbuch von JEAN DIEUDONNÉ abgesehen von den dreiteiligen Abschnittsnummern praktisch keine Zahlen außer 0, 1 und 2 vorkommen.

Die Zahlentheorie unterscheidet sich dadurch von anderen Teilen der Mathematik, daß es dort vor allem um *ganze* Zahlen geht, oft sogar einfach um die natürlichen Zahlen $1, 2, 3, \dots$. Die frühe griechische Philosophie der Pythagoräer beispielsweise stand unter dem Motto *Alles ist Zahl*. Sie konnten die musikalischen Harmonien auf einfache Verhältnisse natürlicher Zahlen zurückführen und waren überzeugt, daß dies auch für alle anderen Proportionen galt.

Umso größer war der Schock, als um 450 v.Chr. einer von ihnen, wahrscheinlich HIPASSOS VON METAPONT, herausfand, daß es in der Geometrie Längenverhältnisse gibt, die sich *nicht* so beschreiben lassen. Schlimmer noch: Ein Beispiel dafür bietet ausgerechnet das Wahrzeichen der Pythagoräer, das Pentagramm. HIPASSOS VON METAPONT nahm deshalb auch ein schlimmes Ende: Nach einigen Überlieferungen wurde er von den erzürnten Pythagoräern ertränkt, nach anderen ließen ihn die Götter als Strafe für seine Schandtat bei einem Schiffsuntergang ertrinken.



PYTHAGORAS VON SAMOS lebte etwa von 569 bis 475. Als ungefähr 18-Jähriger besuchte er THALES in Milot und ging auf dessen Rat 535 nach Ägypten, um mehr über Mathematik und Astronomie zu lernen. Im Tempel von Diospolis wurde er nach der dafür vorgesehen Ausbildung in die Priesterschaft aufgenommen. 525, bei der persischen Invasion Ägyptens, geriet er in Gefangenschaft und wurde nach Babylon gebracht, was er nutzte er, um die dortige Mathematik zu erlernen. 520 kam er frei und kehrte zurück nach Samos, zog aber schon bald weiter nach Croton in Süditalien, wo er eine religiöse und philosophische Schule gründete, die Pythagoräer.

Wir wollen uns hier mit einem einfacheren Fall als dem des Pentagramms beschäftigen, dem Verhältnis zwischen der Diagonale und der Seite eines Quadrats. In einem Quadrat der Seitenlänge a kann die Diagonale aufgefaßt werden als Hypotenuse eines gleichschenkligen rechtwinkligen Dreiecks mit Katheten der Länge a ; sie hat daher nach dem Satz des PYTHAGORAS (der tatsächlich wohl einige hundert Jahre älter als PYTHAGORAS sein dürfte) die Länge $a\sqrt{2}$, und das gesuchte Verhältnis ist $\sqrt{2}$.

Wäre $\sqrt{2}$ als Verhältnis a/b zweier natürlicher Zahlen darstellbar, so könnten wir ohne Beschränkung der Allgemeinheit annehmen, daß mindestens eine der beiden Zahlen a und b ungerade ist: Andernfalls müßten wir einfach so lange durch zwei kürzen, bis dies der Fall ist.

Quadrieren wir beide Seiten der Gleichung $a/b = \sqrt{2}$, so erhalten wir die neue Gleichung $a^2/b^2 = 2$; demnach müßte $a^2 = 2b^2$ eine gerade Zahl sein. Damit müßte aber auch a gerade sein, denn wäre $a = 2c + 1$ ungerade, so auch $a^2 = 2 \cdot (2c^2 + c) + 1$. Wenn aber a durch zwei teilbar ist, ist $a^2 = 2b^2$ durch vier teilbar, also wäre auch b^2 und damit auch b gerade, ein Widerspruch. Somit ist $\sqrt{2}$ keine rationale Zahl.

Auch das Verhältnis zwischen Umfang und Durchmesser eines Kreises, für das wir heute die Bezeichnung π verwenden, ist nicht rational, allerdings erfordert der Beweis dafür etwas mehr Arbeit. Ich möchte ihn trotzdem hier vorstellen, denn er zeigt sehr schön, wie zahlentheoretische Aussagen teilweise nur auf Umwegen über andere Gebiete der Mathematik bewiesen werden können. Beim folgenden Beweis führt

dieser Umweg über die reelle Analysis:

Wir gehen zunächst aus von einem beliebigen Polynom $P(x)$ mit reellen Koeffizienten von einem geraden Grad $2n$. Dazu definieren wir das Polynom

$$Q(x) \stackrel{\text{def}}{=} P(x) - P''(x) + P^{(4)}(x) - \dots + (-1)^n P^{(2n)}(x)$$

als die alternierende Summe der Ableitungen gerader Ordnung von P . Weiter betrachten wir die Funktion $S(x) = Q'(x) \sin x - Q(x) \cos x$; ihre Ableitung ist

$$\begin{aligned} S'(x) &= Q''(x) \sin x + Q'(x) \cos x - Q'(x) \cos x + Q(x) \sin x \\ &= (Q''(x) + Q(x)) \sin x. \end{aligned}$$

In $Q''(x) = P''(x) - P^{(4)}(x) + \dots + (-1)^{n-1} P^{(2n)}(x)$ kommen bis auf $P(x)$ genau dieselben Terme vor wie in $Q(x)$, allerdings mit dem jeweils anderen Vorzeichen. Daher ist $Q''(x) + Q(x) = P(x)$ und $S(x) = Q'(x) \sin x - Q(x) \cos x$ ist eine Stammfunktion von $P(x) \sin x$. Damit folgt die

Formel von Hermite:

$$\int_0^\pi P(x) \sin x \, dx = S(\pi) - S(0) = Q(\pi) + Q(0),$$

denn $\sin 0 = \sin \pi = 0$, $\cos 0 = 1$ und $\cos \pi = -1$.

Wir nehmen nun an, $\pi = a/b$ sei eine rationale Zahl, und wenden die gerade bewiesene Formel an auf das spezielle Polynom

$$P_n(x) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{x^n(a - bx)^n}{n!} = \frac{b^n}{n!} x^n (\pi - x)^n;$$

wir erhalten

$$I_n \stackrel{\text{def}}{=} \int_0^\pi P_n(x) \sin x \, dx = Q_n(\pi) + Q_n(0)$$

mit $Q_n(x) \stackrel{\text{def}}{=} P_n(x) - P_n''(x) + P_n^{(4)}(x) - \dots + (-1)^n P_n^{(2n)}(x)$.

$P_n(x)$ ist im Intervall $(0, \pi)$ genau wie die Sinusfunktion überall positiv; daher ist $I_n > 0$. Außerdem ist $P_n(x)$ symmetrisch zu $\pi/2$, denn wie die zweite Darstellung der Funktion zeigt, vertauschen sich einfach die beiden Faktoren x^n und $(\pi - x)^n$, wenn wir x durch $\pi - x$ ersetzen.

Das Maximum von P_n in $(0, \pi)$ wird an derselben Stelle angenommen wie das der Funktion $f(x) = x(\pi - x)$; da $f'(x) = \pi - 2x$ nur in Intervallmitte $\pi/2 = a/2b$ verschwindet, liegt es dort und dort ist

$$P_n\left(\frac{\pi}{2}\right) = P_n\left(\frac{a}{2b}\right) = \frac{1}{n!} \left(\frac{a}{2b}\right)^n \left(\frac{ab}{2b}\right)^n = \frac{1}{n!} \frac{a^{2n}}{(4b)^n}.$$

Schätzen wir das Integral ab durch Intervalllänge mal Maximum des Integranden, erhalten wir daher die Ungleichung

$$I_n \leq \pi \cdot \frac{1}{n!} \frac{a^{2n}}{(4b)^n}$$

und sehen, daß I_n für $n \rightarrow \infty$ gegen Null geht: $n!$ wächst bekanntlich schneller als jede Potenz einer reellen Zahl. Somit ist

$$\lim_{n \rightarrow \infty} I_n = 0.$$

Andererseits ist aber $I_n = Q_n(0) + Q_n(\pi)$, was in diesem Fall wegen der Symmetrie von P_n einfach $2Q_n(0)$ ist. Wir wollen uns überlegen, daß alle $Q_n(0)$ ganze Zahlen sind. Dazu reicht es zu zeigen, daß alle Ableitungen von $P_n(x)$ an der Stelle Null ganzzahlige Werte annehmen. Nach der binomischen Formel ist

$$P_n(x) = \frac{x^n(a - bx)^n}{n!} = \frac{1}{n!} \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} a^{n-i} (-b)^i x^{n+i};$$

die k -te Ableitung verschwindet also für $k < n$ an der Stelle Null. Für $k = n + i \geq n$ ist

$$P_n^{(k)}(0) = \frac{1}{n!} \binom{n}{i} a^{n-i} (-b)^i (n+i)!$$

ebenfalls eine ganze Zahl, da der Nenner $n!$ Teiler von $(n+i)!$ ist und ansonsten nur ganze Zahlen dastehen.

Somit ist also I_n für jedes $n \in \mathbb{N}$ eine positive ganze Zahl. Der Limes einer Folge positiver ganzer Zahlen kann aber unmöglich Null sein,

also führt die Annahme, $\pi = a/b$ sei eine rationale Zahl, zu einem Widerspruch, der die Irrationalität von π zeigt.

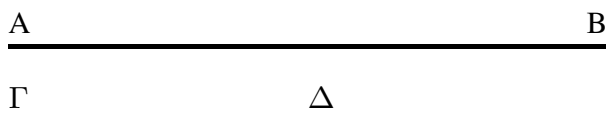
Wenn man schon dabei ist, kann man leicht auch noch viele andere wichtige Zahlen als irrational erkennen; auf dem ersten Übungsblatt ist ein Beweis für die Irrationalität der EULERSchen Zahl e skizziert, und mit nur wenig mehr Aufwand als im Fall der Quadratwurzel aus zwei läßt sich auch leicht zeigen, daß *jede* Quadratwurzel einer natürlichen Zahl entweder ganzzahlig oder irrational ist. Dasselbe gibt für höhere Wurzeln und sogar für Nullstellen aller Polynome mit ganzzahligen Koeffizienten und höchstem Koeffizient eins, allerdings brauchen wir zum Beweis einen Satz, den zwar fast jeder kennt, dessen Beweis man aber nur selten sieht: Die eindeutige Primzerlegung der natürlichen Zahlen. Den ersten vollständigen Beweis dieser Aussage fand GAUSS 1798; er erschien 1801 in seinen *Disquisitiones Arithmeticae*. Heute verwendet man beim Beweis meist eine Konstruktion, die wahrscheinlich bereits den Pythagoräern bekannt war, die wir aber als EUKLIDischen Algorithmus bezeichnen. Wie sich zeigen wird, ist er zusammen mit einer ganzen Reihe von Varianten ein nicht nur in der Zahlentheorie allgegenwärtiges Werkzeug; es lohnt sich also, ihn gleichs jetzt zum Beginn der Vorlesung etwas ausführlicher zu betrachten.

§2: Der Euklidische Algorithmus

Bei EUKLID, in Proposition 2 des siebten Buchs seiner *Elemente*, wird er (in der Übersetzung von CLEMENS THAER in Oswalds Klassikern der exakten Wissenschaft) so beschrieben:

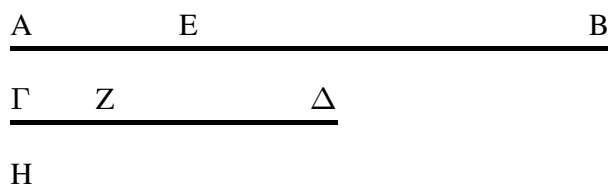
Zu zwei gegebenen Zahlen, die nicht prim gegeneinander sind, ihr größtes gemeinsames Maß zu finden.

Die zwei gegebenen Zahlen, die nicht prim, gegeneinander sind, seien $AB, \Gamma\Delta$. Man soll das größte gemeinsame Maß von $AB, \Gamma\Delta$ finden.



Wenn $\Gamma\Delta$ hier AB mißt – sich selbst mißt es auch – dann ist $\Gamma\Delta$ gemeinsames Maß von $\Gamma\Delta, AB$. Und es ist klar, daß es auch das größte ist, denn keine Zahl größer $\Gamma\Delta$ kann $\Gamma\Delta$ messen.

Wenn $\Gamma\Delta$ aber AB nicht mißt, und man nimmt bei AB , $\Gamma\Delta$ abwechselnd immer das kleinere vom größeren weg, dann muß (schließlich) eine Zahl übrig bleiben, die die vorangehende mißt. Die Einheit kann nämlich nicht übrig bleiben; sonst müßten $AB, \Gamma\Delta$ gegeneinander prim sein, gegen die Voraussetzung. Also muß eine Zahl übrig bleiben, die die vorangehende mißt. $\Gamma\Delta$ lasse, indem es BE mißt, EA , kleiner als sich selbst übrig; und EA lasse, indem es ΔZ mißt, $Z\Gamma$, kleiner als sich selbst übrig; und ΓZ messe AE .



Da ΓZ AE mißt und AE ΔZ , muß ΓZ auch ΔZ messen; es mißt aber auch sich selbst, muß also auch das Ganze $\Gamma\Delta$ messen. $\Gamma\Delta$ mißt aber BE ; also mißt ΓZ auch BE ; es mißt aber auch EA , muß also auch das Ganze BA messen. Und es mißt auch $\Gamma\Delta$; ΓZ mißt also AB und $\Gamma\Delta$; also ist ΓZ gemeinsames Maß von $AB, \Gamma\Delta$. Ich behaupte, daß es auch das größte ist. Wäre nämlich ΓZ nicht das größte gemeinsame Maß von $AB, \Gamma\Delta$, so müßte irgendeine Zahl größer ΓZ die Zahlen AB und $\Gamma\Delta$ messen. Dies geschehe; die Zahl sei H . Da H dann $\Gamma\Delta$ mäßt und $\Gamma\Delta$ BE mißt, mäßt H auch BE ; es soll aber auch das Ganze BA messen, müßte also auch den Rest AE messen. AE mißt aber ΔZ ; also müßte H auch ΔZ messen; es soll aber auch das Ganze $\Delta\Gamma$ messen, müßte also auch den Rest ΓZ messen, als größere Zahl die kleinere; dies ist unmöglich. Also kann keine Zahl größer ΓZ die Zahlen AB und $\Gamma\Delta$ messen; ΓZ ist also das größte gemeinsame Maß von $AB, \Gamma\Delta$; dies hatte man beweisen sollen.

Aus heutiger Sicht erscheint hier die Voraussetzung, daß die betrachteten Größen nicht teilerfremd sein dürfen, seltsam. Sie erklärt sich daraus, daß in der griechischen Philosophie und Mathematik die Einheit eine Sonderrolle einnahm und nicht als Zahl angesehen wurde: Die Zahlen begannen erst mit der Zwei. Dementsprechend führt EUKLID in Proposition 1 des siebten Buchs fast wörtlich dieselbe Konstruktion durch für den Fall von teilerfremden Größen. Schon wenig später wurde die Eins auch in Griechenland als Zahl anerkannt, und für uns heute ist die Unterscheidung ohnehin bedeutungslos. Wir können die Bedingung, daß der ggT ungleich eins sein soll, also einfach ignorieren.

Das dem EUKLIDischen Algorithmus zugrunde liegende Prinzip der *Wechselwegnahme* oder wechselseitigen Subtraktion war in der grie-

chischen Mathematik spätestens gegen Ende des fünften vorchristlichen Jahrhunderts bereits wohlbekannt unter dem Namen Antanairesis (ἀνταναιρέσις) oder auch Anthyphairesis (ἀνθυφαιρέσις), und auch der Algorithmus selbst geht mit ziemlicher Sicherheit, wie so vieles in den Elementen, *nicht* erst auf EUKLID zurück: Seine *Elemente* waren das wohl mindestens vierte Buchprojekt dieses Namens, und alles spricht dafür, daß er vieles von seinen Vorgängern übernommen hat. Seine Elemente waren dann aber mit Abstand die erfolgreichsten, so daß die anderen in Vergessenheit gerieten und verloren gingen; EUKLID wurde schließlich als *der* Stoichist bekannt nach dem griechischen Titel στοιχεῖα der Elemente.



Es ist nicht ganz sicher, ob EUKLID (Εὐκλείδης) wirklich gelebt hat; es ist möglich, wenn auch sehr unwahrscheinlich, daß EUKLID nur ein Pseudonym für eine Autorengruppe ist. (Das nebenstehende Bild aus dem 18. Jahrhundert ist reine Phantasie.) EUKLID ist vor allem bekannt als Autor der *Elemente*, in denen er die Geometrie seiner Zeit systematisch darstellte und (in gewisser Weise) auf wenige Definitionen sowie die berühmten fünf Postulate zurückführte; sie entstanden um 300 v. Chr. EUKLID arbeitete wohl am Museion in Alexandrien; außer den Elementen schrieb er ein Buch über Optik und weitere, teilweise verschollene Bücher.

Wenn wir nicht mit Zirkel und Lineal arbeiten, sondern rechnen, können wir die mehrfache „Wegnahme“ einer Strecke von einer anderen einfacher beschreiben durch eine Division mit Rest: Sind a und b die (als natürliche Zahlen vorausgesetzten) Längen der beiden Strecken und ist $a : b = q$ Rest r , so kann man q mal die Strecke b von a wegnehmen; was übrig bleibt ist eine Strecke der Länge $r < b$.

EUKLIDS Konstruktion wird dann zu folgendem Algorithmus für zwei natürliche Zahlen a, b :

Schritt 0: Setze $r_0 = a$ und $r_1 = b$.

Schritt $i, i \geq 1$: Falls r_i verschwindet, endet der Algorithmus mit $\text{ggT}(a, b) = r_{i-1}$; andernfalls sei r_{i+1} der Rest bei der Division von r_{i-1} durch r_i .

EUKLID behauptet, daß dieser Algorithmus stets endet und daß das Ergebnis der größte gemeinsame Teiler der Ausgangszahlen a, b ist, d.h. die größte natürliche Zahl, die sowohl a als auch b teilt.

Da der Divisionsrest r_{i+1} stets echt kleiner ist als sein Vorgänger r_i und eine Folge immer kleiner werdender nichtnegativer ganzer Zahlen notwendigerweise nach endlich vielen Schritten die Null erreicht, muß der Algorithmus in der Tat stets enden. Daß er mit dem richtigen Ergebnis endet, ist ebenfalls leicht zu sehen, denn im i -ten Schritt ist

$$r_{i-1} = q_i r_i + r_{i+1} \quad \text{oder} \quad r_{i+1} = r_{i-1} - q_i r_i,$$

so daß jeder gemeinsame Teiler von r_i und r_{i+1} auch ein Teiler von r_{i-1} ist und umgekehrt jeder gemeinsame Teiler von r_{i-1} und r_i auch r_{i+1} teilt. Somit haben r_i und r_{i-1} dieselben gemeinsamen Teiler wie r_i und r_{i+1} , insbesondere haben sie denselben größten gemeinsamen Teiler. Durch Induktion folgt, daß in jedem Schritt $\text{ggT}(r_i, r_{i-1}) = \text{ggT}(a, b)$ ist. Im letzten Schritt ist $r_i = 0$; da jede natürliche Zahl Teiler der Null ist, ist dann $r_{i-1} = \text{ggT}(r_i, r_{i-1}) = \text{ggT}(a, b)$, wie behauptet.

§3: Der erweiterte Euklidische Algorithmus

Mehr als zwei Tausend Jahre nach der Entdeckung von Anthyphaire-sis und EUKLIDISCHEM Algorithmus, 1624 in Bourg-en-Bresse, stellte BACHET DE MÉZIRIAC in der zweiten Auflage seines Buchs *Problèmes plaisants et délectables qui se font par les nombres* Aufgaben wie die folgende:

Il y a 41 personnes en un banquet tant hommes que femmes et enfants qui en tout dépensent 40 sous, mais chaque homme paye 4 sous, chaque femme 3 sous, chaque enfant 4 deniers. Je demande combien il y a d'hommes, combien de femmes, combien d'enfants.

(Bei einem Bankett sind 41 Personen, Männer, Frauen und Kinder, die zusammen vierzig Sous ausgeben, aber jeder Mann zahlt vier Sous, jede Frau drei Sous und jedes Kind 4 Deniers. Ich frage, wie viele Männer, wie viele Frauen und wie viele Kinder es sind.)

Sobald man weiß, daß zwölf Deniers ein Sou sind (und zwanzig Sous ein Pfund), kann man dies in ein lineares Gleichungssystem übersetzen:

Ist x die Zahl der Männer, y die der Frauen und z die der Kinder, so muß gelten $x + y + z = 41$ und $4x + 3y + \frac{1}{3}z = 40$.

Im Gegensatz zum Fall der in Schule und Linearer Algebra betrachteten Gleichungssystemen kommen hier natürlich nur natürliche Zahlen als Lösungen in Frage.



CLAUDE GASPAR BACHET SIEUR DE MÉZIRIAC (1581-1638) verbrachte den größten Teil seines Lebens in seinem Geburtsort Bourg-en-Bresse. Er studierte bei den Jesuiten in Lyon und Milano und trat 1601 in den Orden ein, trat aber bereits 1602 wegen Krankheit wieder aus und kehrte nach Bourg zurück. Sein Buch erschien 1612; 1959 brachte der Verlag Blanchard eine vereinfachte Ausgabe heraus. Am bekanntesten ist BACHET für seine lateinische Übersetzung der *Arithmetika* von DIOPHANTOS. In einem Exemplar davon schrieb FERMAT seine Vermutung an den Rand. Auch Gedichte von BACHET sind erhalten. 1635 wurde er Mitglied der französischen Akademie der Wissenschaften.

Zur Lösung kann man zunächst die erste Gleichung nach z auflösen und in die zweite Gleichung einsetzen; dies führt auf die Gleichung

$$\frac{11}{3}x + \frac{8}{3}y = \frac{79}{3} \quad \text{oder} \quad 11x + 8y = 79.$$

Bei einer solchen Gleichung ist *a priori* nicht klar, ob es überhaupt Lösungen gibt: Die Gleichung $10x + 8y = 79$ beispielsweise kann keine haben, denn für ganze Zahlen x, y ist $10x + 8y$ stets gerade. Allgemein kann $ax + by = c$ höchstens dann ganzzahlige Lösungen haben, wenn der ggT von a und b Teiler von c ist.

BACHET DE MÉZIRIAC hat bewiesen, daß sie in diesem Fall auch stets Lösungen hat; das Kernstück dazu ist seine Proposition XVIII, wo er zu zwei teilerfremden Zahlen a, b ganze Zahlen x, y konstruiert, für die $ax - by = 1$ ist: *Deux nombres premiers entre eux estant donnéz, treuver le moindre multiple de chascun d'iceux, surpassant de l'unité un multiple de l'autre*. Die Methode ist eine einfache Erweiterung des EUKLIDischen Algorithmus, und genau wie letzterer nach EUKLID benannt ist, da ihn dieser rund 150 Jahre nach seiner Entdeckung in seinem Lehrbuch darstellte, heißt auch BACHETS Satz heute *Identität von*

BÉZOUT, weil dieser ihn 142 Jahre später, im Jahre 1766, in seinem Lehrbuch beschrieb (und auf Polynome verallgemeinerte).



ETIENNE BÉZOUT (1730-1783) wurde in Nemours in der Ile-de-France geboren, wo seine Vorfahren Magistrate waren. Er ging stattdessen an die Akademie der Wissenschaften; seine Hauptbeschäftigung war die Zusammenstellung von Lehrbüchern für die Militärausbildung. Im 1766 erschienenen dritten Band (von vier) seines *Cours de Mathématiques à l'usage des Gardes du Pavillon et de la Marine* ist die Identität von BÉZOUT dargestellt. Seine Bücher waren so erfolgreich, daß sie auch ins Englische übersetzt und als Lehrbücher z.B. in Harvard benutzt wurden. Heute ist er vor allem auch bekannt durch seinen Beweis, daß sich zwei Kurven der Grade n und m in höchstens nm Punkten schneiden können.

Zur Lösung von Problemen wie dem von BACHET wollen wir gleich allgemein den größten gemeinsamen Teiler zweier Zahlen als Linearkombination dieser Zahlen darstellen. Dazu ist nur eine kleine Erweiterung des EUKLIDISCHEN Algorithmus notwendig, so daß man oft auch einfach vom erweiterten EUKLIDISCHEN Algorithmus spricht.

Die Gleichung

$$r_{i-1} = q_i r_i + r_{i+1}$$

läßt sich umschreiben als

$$r_{i+1} = r_{i-1} - q_i r_i,$$

so daß r_{i+1} eine ganzzahlige Linearkombination von r_i und r_{i-1} ist. Da entsprechend auch r_i Linearkombination von r_{i-1} und r_{i-2} ist, folgt induktiv, daß der ggT von a und b als ganzzahlige Linearkombination von a und b dargestellt werden kann.

Algorithmisch sieht dies folgendermaßen aus:

Schritt 0: Setze $r_0 = a$, $r_1 = b$, $\alpha_0 = \beta_1 = 1$ und $\alpha_1 = \beta_0 = 0$. Für $i = 1$ ist dann

$$r_{i-1} = \alpha_{i-1}a + \beta_{i-1}b \quad \text{und} \quad r_i = \alpha_i a + \beta_i b.$$

Im i -ten Schritt werden neue Zahlen berechnet derart, daß diese Gleichungen auch für $i + 1$ gelten:

Schritt i , $i \geq 1$: Falls r_i verschwindet, endet der Algorithmus mit

$$\text{ggT}(a, b) = r_{i-1} = \alpha_{i-1}a + \beta_{i-1}b.$$

Andernfalls dividiere man r_{i-1} durch r_i ; der Divisionsrest sei r_{i+1} . Dann ist

$$\begin{aligned} r_{i+1} &= r_{i-1} - q_i r_i = (\alpha_{i-1}a + \beta_{i-1}b) - q_i(\alpha_i a + \beta_i b) \\ &= (\alpha_{i-1} - q_i \alpha_i)a + (\beta_{i-1} - q_i \beta_i)b; \end{aligned}$$

die gewünschten Gleichungen gelten also für

$$\alpha_{i+1} = \alpha_{i-1} - q_i \alpha_i \quad \text{und} \quad \beta_{i+1} = \beta_{i-1} - q_i \beta_i.$$

Genau wie oben folgt, daß der Algorithmus für alle natürlichen Zahlen a und b endet und daß am Ende der richtige ggT berechnet wird; außerdem sind die α_i und β_i so definiert, daß in jedem Schritt $r_i = \alpha_i a + \beta_i b$ ist, insbesondere wird also im letzten Schritt der ggT als Linearkombination der Ausgangszahlen dargestellt.

Als Beispiel wollen wir den ggT von 200 und 148 als Linearkombination darstellen. Im nullten Schritt haben wir 200 und 148 als die trivialen Linearkombinationen

$$200 = 1 \cdot 200 + 0 \cdot 148 \quad \text{und} \quad 148 = 0 \cdot 200 + 1 \cdot 148.$$

Im ersten Schritt dividieren wir, da 148 nicht verschwindet, 200 mit Rest durch 148:

$$200 = 1 \cdot 148 + 52 \quad \text{und} \quad 52 = 1 \cdot 200 - 1 \cdot 148.$$

Da auch $52 \neq 0$, dividieren wir im zweiten Schritt 148 durch 52:

$$148 = 2 \cdot 52 + 44 \quad \text{und} \quad 44 = 148 - 2 \cdot (1 \cdot 200 - 1 \cdot 148) = 3 \cdot 148 - 2 \cdot 200.$$

Auch $44 \neq 0$; wir machen also weiter: $52 = 1 \cdot 44 + 8$ und

$$8 = 52 - 44 = (1 \cdot 200 - 1 \cdot 148) - (3 \cdot 148 - 2 \cdot 200) = 3 \cdot 200 - 4 \cdot 148.$$

Im nächsten Schritt erhalten wir $44 = 5 \cdot 8 + 4$ und

$$4 = 44 - 5 \cdot 8 = (3 \cdot 148 - 2 \cdot 200) - 5 \cdot (3 \cdot 200 - 4 \cdot 148) = 23 \cdot 148 - 17 \cdot 200.$$

Bei der Division von acht durch vier schließlich ist der Divisionsrest null; damit ist $4 = 23 \cdot 148 - 17 \cdot 200$ der ggT von 148 und 200.

Zur Lösung des Problems von BACHET müssen wir die Gleichung $11x + 8y = 79$ betrachten. Dazu stellen wir zunächst den ggT von 11 und 8 als Linearkombination dieser Zahlen dar.

Elf durch acht ist eins Rest drei, also ist $3 = 1 \cdot 11 - 1 \cdot 8$.

Im nächsten Schritt dividieren wir acht durch drei mit dem Ergebnis zwei Rest zwei, also ist $2 = 1 \cdot 8 - 2 \cdot 3 = 1 \cdot 8 - 2 \cdot (1 \cdot 11 - 1 \cdot 8) = -2 \cdot 11 + 3 \cdot 8$.

Im letzten Schritt wird daher drei durch zwei dividiert und wir sehen erstens, daß der ggT gleich eins ist (was hier keine Überraschung ist), und zweitens, daß gilt $1 = 3 - 2 = (1 \cdot 11 - 1 \cdot 8) - (-2 \cdot 11 + 3 \cdot 8) = 3 \cdot 11 - 4 \cdot 8$.

Damit haben wir auch eine Darstellung von 79 als Linearkombination von elf und acht:

$$79 = 79 \cdot (3 \cdot 11 - 4 \cdot 8) = 237 \cdot 11 - 316 \cdot 8.$$

Dies ist allerdings nicht die gesuchte Lösung: BACHET dachte sicherlich nicht an 237 Männer, -316 Frauen und 119 Kinder.

Nun ist aber die obige Gleichung $1 = 3 \cdot 11 - 4 \cdot 8$ nicht die einzige Möglichkeit zur Darstellung der Eins als Linearkombination von acht und elf: Da $8 \cdot 11 - 11 \cdot 8$ verschwindet, können wir ein beliebiges Vielfaches dieser Gleichung dazuaddieren und bekommen die allgemeinere Lösung

$$(3 + 8k) \cdot 11 - (4 + 11k) \cdot 8 = 1.$$

Entsprechend können wir auch ein beliebiges Vielfaches dieser Gleichung zur Darstellung von 79 addieren:

$$79 = (237 + 8k) \cdot 11 - (316 + 11k) \cdot 8.$$

Wir müssen k so wählen, daß sowohl die Anzahl $237 + 8k$ der Männer als auch die Anzahl $-(316 + 11k)$ der Frauen positiv oder zumindest nicht negativ wird, d.h. $-\frac{237}{8} \leq k \leq -\frac{316}{11}$. Da k ganzzahlig sein muß, kommt nur $k = -29$ in Frage; es waren also fünf Männer, drei Frauen und dazu noch $41 - 5 - 3 = 33$ Kinder. Ihre Gesamtausgaben belaufen sich in der Tat auf $5 \cdot 4 + 3 \cdot 3 + 33 \cdot \frac{1}{3} = 40$ Sous.

Entsprechend kann der erweiterte EUKLIDISCHE Algorithmus zur Lösung anderer diophantischer Gleichungen verwendet werden, von Gleichungen also, bei denen nur ganzzahlige Lösungen interessieren. Wir betrachten hier nur die lineare Gleichung $ax + by = c$ mit $a, b, c \in \mathbb{Z}$ für zwei Unbekannte $x, y \in \mathbb{Z}$.

Der größte gemeinsame Teiler $d = \text{ggT}(a, b)$ von a und b teilt offensichtlich jeden Ausdruck der Form $ax + by$ mit $x, y \in \mathbb{Z}$; falls d kein Teiler von c ist, kann es also keine ganzzahlige Lösung geben.

Ist aber $c = rd$ ein Vielfaches von d und ist $d = \alpha a + \beta b$ die lineare Darstellung des ggT nach dem erweiterten EUKLIDISCHEN Algorithmus, so haben wir mit $x = r\alpha$ und $y = r\beta$ offensichtlich eine Lösung gefunden.

Ist (x', y') eine weitere Lösung, so ist

$$a(x - x') + b(y - y') = c - c = 0 \quad \text{oder} \quad a(x - x') = b(y' - y).$$

$v = a(x - x') = b(y' - y)$ ist also ein gemeinsames Vielfaches von a und b und damit auch ein Vielfaches des kleinsten gemeinsamen Vielfachen von a und b . Dieses kleinste gemeinsame Vielfache ist ab/d , es muß also eine ganze Zahl m geben mit

$$x - x' = m \cdot \frac{b}{d} \quad \text{und} \quad y' - y = m \cdot \frac{a}{d}.$$

Die allgemeine Lösung der obigen Gleichung ist somit

$$x = r\alpha - m \cdot \frac{b}{d} \quad \text{und} \quad y = r\beta + m \cdot \frac{a}{d} \quad \text{mit} \quad m \in \mathbb{Z}.$$

§4: Der Aufwand des Euklidischen Algorithmus

Im Beweis, daß der EUKLIDISCHE Algorithmus stets nach endlich vielen Schritten abbricht, hatten wir argumentiert, daß der Divisionsrest stets kleiner ist als der Divisor, so daß er irgendwann einmal null werden muß; dann endet der Algorithmus.

Damit haben wir auch eine obere Schranke für den Rechenaufwand zur Berechnung von $\text{ggT}(a, b)$: Wir müssen höchstens b Divisionen durchführen.

Das erscheint zwar auf den ersten Blick als ein recht gutes Ergebnis; wenn man aber bedenkt, daß der EUKLIDISCHE Algorithmus heute in der Kryptographie auf über 600-stellige Zahlen angewendet wird, verliert diese Schranke schnell ihre Nützlichkeit: Da unser Universum ein geschätztes Alter von zehn Milliarden Jahren, also ungefähr $3 \cdot 10^{18}$ Sekunden hat, ist klar, daß auch der schnellste heutige Computer, der zu Beginn des Universum zu rechnen begann, bis heute nur einen verschwindend kleinen Bruchteil von 10^{600} Divisionen ausgeführt hätte. Wäre 10^{600} eine realistische Aufwandsabschätzung, könnten wir an eine Anwendung des EUKLIDISCHEN Algorithmus auf 600-stellige Zahlen nicht einmal denken.

Tatsächlich ist 10^{600} aber natürlich nur eine obere Schranke, von der wir bislang noch nicht wissen, wie realistisch sie ist. Um dies zu entscheiden, suchen wir die kleinsten natürlichen Zahlen a, b , für die n Divisionen notwendig sind; dies wird uns auf ein bekanntes Problem aus dem 13. Jahrhundert führen.

Im Falle $n = 1$ sind offensichtlich $a = b = 1$ die kleinstmöglichen Zahlen; wenn $a = b$ ist, kommt man immer mit genau einer Division aus.

Dies ist allerdings ein eher untypischer Fall, der sich insbesondere nicht rekursiv verallgemeinern läßt, denn ab dem zweiten Schritt des EUKLIDISCHEN Algorithmus ist der Divisor stets kleiner als der Dividend: Ersterer ist schließlich der Rest bei der vorangegangenen Division und letzterer der Divisor. Die kleinsten natürlichen Zahlen $a \neq b$, für die man mit nur einer Division auskommt, sind offensichtlich $a = 2$ und $b = 1$.

Als nächstes suchen wir die kleinsten Zahlen a, b für die zwei Divisionen notwendig sind. Ist r der Rest bei der ersten Division, so ist $b : r$ die zweite Division. Für diese muß $r \geq 1$ und $b \geq 2$ sein, und $a = qb + r$, wobei q der Quotient bei der ersten Division ist. Dieser ist mindestens eins, die kleinstmöglichen Werte sind damit

$$r = 1, \quad b = 2 \quad \text{und} \quad a = b + r = 3.$$

Allgemeiner seien a_n und b_n die kleinsten Zahlen, für die n Divisionen notwendig sind, und r sei der Rest bei der ersten Division. Für die zweite

Division $b : r$ ist dann $b_n \geq a_{n-1}$ und $r \geq b_{n-1}$; die kleinstmöglichen Werte sind damit

$$r = b_{n-1}, \quad b_n = a_{n-1} \quad \text{und} \quad a_n = b_n + r = a_{n-1} + b_{n-1} = a_{n-1} + a_{n-2}.$$

Da wir $a_1 = 2$ und $b_1 = 1$ kennen, können wir somit alle a_n und b_n berechnen; was wir erhalten, sind die sogenannten FIBONACCI-Zahlen.

Sie sind durch folgende Rekursionsformel definiert:

$$F_0 = 0, \quad F_1 = 1 \quad \text{und} \quad F_n = F_{n-1} + F_{n-2} \quad \text{für } n \geq 2.$$

FIBONACCI führte sie ein, um die Vermehrung einer Karnickelpopulation durch ein einfaches Modell zu berechnen. In seinem 1202 erschienenen Buch *Liber abaci* schreibt er:

Ein Mann bringt ein Paar Karnickel auf einen Platz, der von allen Seiten durch eine Mauer umgeben ist. Wie viele Paare können von diesem Paar innerhalb eines Jahres produziert werden, wenn man annimmt, daß jedes Paar jeden Monat ein neues Paar liefert, das vom zweiten Monat nach seiner Geburt an produktiv ist?



LEONARDO PISANO (1170–1250) ist heute vor allem unter seinem Spitznamen FIBONACCI bekannt; gelegentlich nannte er sich auch BIGOLLO, auf Deutsch *Tunichtgut* oder *Reisender*. Er ging in Nordafrika zur Schule, kam aber 1202 zurück nach Pisa. Seine Bücher waren mit die ersten, die die indisch-arabischen Ziffern in Europa einführten. Er behandelt darin nicht nur Rechenaufgaben für Kaufleute, sondern auch zahlentheoretische Fragen, beispielsweise daß man die Quadratzahlen durch Aufaddieren der ungeraden Zahlen erhält. Auch betrachtet er nichtlineare Gleichungen, die er approximativ löst, und erinnert an viele in Vergessenheit geratene Ergebnisse der antiken Mathematik.

Wie wir gerade gesehen haben, kann man mit den FIBONACCI-Zahlen nicht nur Karnickelpopulationen beschreiben, sondern – wie GABRIEL LAMÉ 1844 entdeckte – auch eine Obergrenze für den Aufwand beim EUKLIDischen Algorithmus angeben:

Satz von Lamé (1844): Die kleinsten natürlichen Zahlen a, b , für die beim EUKLIDISCHEN Algorithmus $n \geq 2$ Divisionen benötigt werden, sind $a = F_{n+2}$ und $b = F_{n+1}$. ■

(Für $n = 1$ gilt der Satz nur, wenn wir zusätzlich voraussetzen, daß $a \neq b$ ist; für $n \geq 2$ ist dies automatisch erfüllt.)



GABRIEL LAMÉ (1795–1870) studierte von 1813 bis 1817 Mathematik an der Ecole Polytechnique, danach bis 1820 Ingenieurwissenschaften an der Ecole des Mines. Auf Einladung Alexanders I. kam er 1820 nach Rußland, wo er in St. Petersburg als Professor und Ingenieur unter anderem Vorlesungen über Analysis, Physik, Chemie und Ingenieurwissenschaften hielt. 1832 erhielt er einen Lehrstuhl für Physik an der Ecole Polytechnique in Paris, 1852 einen für mathematische Physik und Wahrscheinlichkeitstheorie an der Sorbonne. 1836/37 war er wesentlich am Bau der Eisenbahnlinien Paris-Versailles und Paris-S^t. Germain beteiligt.

Um die Zahlen F_n durch eine geschlossene Formel darzustellen, können wir (genau wie man es auch für die rekursive Berechnung per Computer tun würde) die Definitionsgleichung der FIBONACCI-Zahlen als

$$\begin{pmatrix} F_{n+1} \\ F_n \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} F_n \\ F_{n-1} \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad A = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

schreiben; dann ist

$$\begin{pmatrix} F_n \\ F_{n-1} \end{pmatrix} = A^{n-1} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_0 \end{pmatrix} = A^{n-1} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Das charakteristische Polynom von A ist

$$\det(A - \lambda E) = (1 - \lambda)(-\lambda) - 1 = \lambda^2 - \lambda - 1;$$

die Eigenwerte von A sind daher $\lambda_{1/2} = \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}\sqrt{5}$. Bezeichnet B die Matrix, deren Spalten aus den zugehörigen Eigenvektoren besteht, so ist

also $A = B^{-1} \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} B$ und

$$\begin{pmatrix} F_n \\ F_{n-1} \end{pmatrix} = A^{n-1} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = B^{-1} \begin{pmatrix} \lambda_1^{n-1} & 0 \\ 0 & \lambda_2^{n-1} \end{pmatrix} B \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Auch ohne die Matrix B zu berechnen, wissen wir somit, daß sich F_n in der Form $F_n = u'\lambda_1^{n-1} + v'\lambda_2^{n-1}$ darstellen läßt. Indem wir u' durch λ_1 und v' durch λ_2 dividieren, erhalten wir auch eine Darstellung der Form $F_n = u\lambda_1^n + v\lambda_2^n$, deren Koeffizienten wir durch Einsetzen von $n = 0$ und $n = 1$ bestimmen können:

$$F_0 = 0 = v\lambda_1^0 + u\lambda_2^0 = u + v \quad \text{und} \quad F_1 = 1 = u\lambda_1 + v\lambda_2.$$

Damit ist $v = -u$, und die zweite Gleichung wird zu

$$u(\lambda_1 - \lambda_2) = u\sqrt{5} = 1 \implies u = \frac{1}{\sqrt{5}}, \quad v = -\frac{1}{\sqrt{5}} \quad \text{und} \quad F_n = \frac{\lambda_1^n - \lambda_2^n}{\sqrt{5}}.$$

Numerisch ist

$$\lambda_1 = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \approx 1,618034, \quad \lambda_2 = 1 - \lambda_1 = \frac{1 - \sqrt{5}}{2} \approx -0,618034$$

und $\sqrt{5} \approx 2,236068$; der Quotient $\lambda_2^n/\sqrt{5}$ ist also für jedes n betragsmäßig kleiner als $1/2$. Daher können wir F_n auch einfacher berechnen als nächste ganze Zahl zu $\lambda_1^n/\sqrt{5}$. Insbesondere folgt, daß F_n exponentiell mit n wächst.

Die Gleichung $\lambda^2 - \lambda - 1 = 0$ läßt sich umschreiben als $\lambda(\lambda - 1) = 1$ oder $\lambda : 1 = 1 : (\lambda - 1)$. Diese Gleichung charakterisiert den *goldenen Schnitt*: Stehen zwei Strecken x und y in diesem Verhältnis, so auch die beiden Strecken y und $x - y$. Die positive Lösung λ_1 wird traditionell mit dem Buchstaben ϕ bezeichnet; F_n ist also der zur nächsten ganzen Zahl gerundete Wert von $\phi^n/\sqrt{5}$.

Die beiden kleinsten Zahlen, für die wir n Divisionen brauchen, sind nach LAMÉ $a = F_{n+2}$ und $b = F_{n+1}$. Aus der geschlossenen Formel für die FIBONACCI-Zahlen folgt

$$\begin{aligned} n &\approx \log_{\phi} \sqrt{5} b - 1 = \log_{\phi} b + \log_{\phi} \sqrt{5} - 1 = \frac{\ln b}{\ln \phi} + \frac{\ln \sqrt{5}}{\ln \phi} - 1 \\ &\approx 2,078 \ln b + 0,672. \end{aligned}$$

Für beliebige Zahlen $a > b$ können nicht mehr Divisionen notwendig sein als für die auf b folgenden nächstgrößeren FIBONACCI-Zahlen, also gibt obige Formel für jedes b eine obere Grenze. Die Anzahl der Divisionen wächst daher nicht (wie oben bei der naiven Abschätzung)

wie b , sondern höchstens wie $\log b$. Für sechshundertstellige Zahlen a, b müssen wir daher nicht mit 10^{600} Divisionen rechnen, sondern mit weniger als drei Tausend, was auch mit weniger leistungsfähigen Computern problemlos und schnell möglich ist.

Tatsächlich gibt natürlich auch die hier berechnete Schranke nur selten den tatsächlichen Aufwand wieder; fast immer werden wir mit erheblich weniger auskommen. Im übrigen ist auch alles andere als klar, ob wir den ggT auf andere Weise nicht möglicherweise schneller berechnen können. Da wir aber für Zahlen der Größenordnung, die in heutigen Anwendungen interessieren, selbst mit der Schranke für den schlimmsten Fall ganz gut leben können, sei hier auf diese Fragen nicht weiter eingegangen. Interessenten finden mehr dazu z.B. in den Abschnitten 4.5.2+3 des Buchs

DONALD E. KNUTH: *The Art of Computer Programming, vol. 2: Seminumerical Algorithms, Addison-Wesley, 2* 1981

Eine deutsche Übersetzung des hier relevanten vierten Kapitels erschien 2001 unter dem Titel *Arithmetik* bei Springer.

§5: Die multiplikative Struktur der ganzen Zahlen

Eine Primzahl ist bekanntlich eine natürliche Zahl p , die genau zwei Teiler hat, nämlich die Eins und sich selbst. Der erweiterte EUKLIDISCHE Algorithmus liefert eine wichtige Folgerung aus dieser Definition:

Lemma: Wenn eine Primzahl das Produkt ab zweier natürlicher Zahlen teilt, teilt sie mindestens einen der Faktoren.

Beweis: Angenommen, die Primzahl p sei kein Teiler von a , teile aber ab . Da der ggT von a und p Teiler von p und ungleich p ist, muß er notgedrungen gleich eins sein; es gibt also eine Darstellung

$$1 = \alpha a + \beta p \quad \text{mit} \quad \alpha, \beta \in \mathbb{Z}.$$

Dann ist $b = \alpha ab + \beta pb$ durch p teilbar, denn sowohl ab also auch pb sind Vielfache von p . ■

Daraus folgt induktiv

Korollar: Wenn eine Primzahl ein Produkt $a_1 \cdot \dots \cdot a_r$ natürlicher Zahlen teilt, teilt sie mindestens einen der Faktoren. ■

Hauptsatz der elementaren Zahlentheorie: Jede natürliche Zahl läßt sich bis auf Reihenfolge eindeutig als ein Produkt von Primzahlen schreiben.

Beweis: Die Eins läßt sich nach der üblichen Konvention über leere Produkte als das leere Produkt von Primzahlen darstellen, und es gibt offensichtlich keine andere Darstellung.

Nun sei $n > 1$, und wir nehmen an, der Satz gelte für alle Zahlen kleiner n . Falls n eine Primzahl ist, haben wir mit $n = n$ eine Darstellung der gewünschten Art, und diese ist eindeutig, weil n keine Teiler außer der Eins und sich selbst hat. Andernfalls ist der kleinste von eins verschiedene Teiler p von n echt kleiner als n und muß prim sein, denn ansonsten hätte p einen Teiler q mit $1 < q < p$, der auch Teiler von n , aber kleiner als p wäre. Sei $n = p \cdot a$. Dann ist $a < n$, läßt sich also eindeutig als Produkt von Primzahlen schreiben. Erweitert man dieses Produkt noch um einen Faktor p , hat man auch n als Produkt von Primzahlen dargestellt. Angenommen, n hat noch eine weitere solche Darstellung. Dann kann in dieser Darstellung kein p vorkommen, denn sonst hätte auch a mehrere Produktdarstellungen. Ist andererseits $n = q_1 \cdot \dots \cdot q_r$ irgendeine Darstellung von n als Produkt von Primzahlen, so muß p als Teiler von n nach obigem Korollar mindestens eine der Primzahlen q_i teilen, was nur möglich ist, wenn $q_i = p$ ist. Also gibt es keine weitere Darstellung von n . ■

Die Verwendung des obigen Lemmas macht diesen Beweis recht kurz und durchsichtig; andererseits geht dadurch der erweiterte EUKLIDISCHE Algorithmus in den Beweis ein, und für diesen mußten wir doch einige Zeit investieren. Mit einer kleinen Modifikation, die auf ERNST ZERMELO (1871–1953) zurückgeht, läßt sich der Gebrauch des Korollars im obigen Beweis vermeiden:

Wir müssen zeigen, daß $n = pa$ nicht dargestellt werden kann als ein Produkt von Primzahlen, die allesamt von p verschieden sind. Dazu sei

$q \neq p$ irgendeine Primzahl aus einer Primzerlegung von n und $n = qb$. Dann läßt sich $d = n - pb$ faktorisieren als

$$d = pa - pb = p(a - b) \quad \text{und} \quad d = qb - pb = (q - p)b.$$

Da p der kleinste von eins verschiedene Teiler von n ist, muß $q > p$ und damit $b < a$ sein; daher sind die Zahlen $d, q - p, a - b$ allesamt positiv, und natürlich sind sie auch alle kleiner als n , haben also nach Induktionsannahme eine eindeutige Primzerlegung. Die von $d = p(a - b)$ enthält p . Andererseits ist $d = (q - p)b$, die Primzerlegung von d kann also auch als Produkt der Primzerlegungen von $q - p$ und b interpretiert werden. In der Primzerlegung von $q - p$ kann kein p vorkommen, denn sonst wäre p ein Teiler von q , was für zwei verschiedene Primzahlen nicht möglich ist. Daher kommt p in der Primzerlegung von b vor, also auch in der von $n = qb$. Somit muß p in jeder Primzerlegung von n vorkommen, und damit gibt es bis auf Reihenfolge nur eine Darstellung von n als Produkt von Primzahlen.

Aus dem Hauptsatz der elementaren Zahlentheorie läßt sich auch das Lemma zu Beginn dieses Paragraphen neu beweisen, und zwar im wesentlichen so, wie es EUKLID in Satz 30 des siebten Buch seiner Elemente bewiesen hat: Angenommen, die Primzahl p teilt das Produkt zweier Zahlen a, b , ist aber kein Teiler von a . Dann läßt sich ab schreiben als pc mit einer natürlichen Zahl c , und $a/p = c/b$. Da p prim ist und a nicht teilt, ist a/p ein gekürzter Bruch, der den gleichen Wert hat wie c/b , also (hier kommt der Hauptsatz ins Spiel, auch wenn es bei EUKLID auch ohne geht) entsteht c/b aus a/p durch Erweiterung. Somit ist b ein Vielfaches von p .

Als erste Anwendung dieses Hauptsatzes der elementaren Zahlentheorie können wir das bereits am Ende von §1 erwähnte Resultat über die Irrationalität von Nullstellen ganzzahliger Polynome beweisen:

Satz: Die reelle Zahl x erfülle die Gleichung

$$x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \cdots + a_1x + a_0 = 0 \quad \text{mit} \quad a_i \in \mathbb{Z}.$$

Dann ist x entweder ganzzahlig oder irrational.

Beweis: Jede rationale Zahl x kann als Quotient $x = p/q$ zweier zueinander teilerfremder ganzer Zahlen p und q geschrieben werden. Multiplizieren wir die Gleichung

$$\left(\frac{p}{q}\right)^n + a_{n-1} \left(\frac{p}{q}\right)^{n-1} + \cdots + a_1 \left(\frac{p}{q}\right) + a_0 = 0$$

mit q^n , erhalten wir die nennerlose Gleichung

$$p^n + a_{n-1}p^{n-1}q + \cdots + a_1pq^{n-1} + a_0q^n = 0.$$

Auflösen nach p^n führt auf

$$\begin{aligned} p^n &= -a_{n-1}p^{n-1}q - \cdots - a_1pq^{n-1} - a_0q^n \\ &= q(-a_{n-1}p^{n-1} - \cdots - a_1pq^{n-2} - a_0q^{n-1}), \end{aligned}$$

d.h. q muß ein Teiler von p^n sein, was wegen der Eindeutigkeit der Primfaktorzerlegung von p^n sowie der vorausgesetzten Teilerfremdheit von p und q nur für $q = \pm 1$ der Fall sein kann. Somit ist x eine ganze Zahl, wie behauptet. ■

§6: Kongruenzenrechnung

Zwei ganze Zahlen lassen sich im allgemeinen nicht durcheinander dividieren. Trotzdem – oder gerade deshalb – spielen Teilbarkeitsfragen in der Zahlentheorie eine große Rolle. Das technische Werkzeug zu ihrer Behandlung ist die Kongruenzenrechnung.

Definition: Wir sagen, zwei ganze Zahlen $x, y \in \mathbb{Z}$ seien kongruent modulo m für eine natürliche Zahl m , in Zeichen

$$x \equiv y \pmod{m},$$

wenn $x - y$ durch m teilbar ist.

Die Kongruenz modulo m definiert offensichtlich eine Äquivalenzrelation auf \mathbb{Z} : Jede ganze Zahl ist kongruent zu sich selbst, denn $x - x = 0$ ist durch jede natürliche Zahl teilbar; wenn $x - y$ durch m teilbar ist, so auch $y - x = -(x - y)$, und ist schließlich $x \equiv y \pmod{m}$ und

$y \equiv z \pmod{m}$, so sind $x - y$ und $y - z$ durch m teilbar, also auch ihre Summe $x - z$, und damit ist auch $x \equiv z \pmod{m}$.

Zwei Zahlen $x, y \in \mathbb{Z}$ liegen genau dann in derselben Äquivalenzklasse, wenn sie bei der Division durch m denselben Divisionsrest haben; es gibt somit m Äquivalenzklassen, die den m möglichen Divisionsresten $0, 1, \dots, m - 1$ entsprechen.

Lemma: Ist $x \equiv x' \pmod{m}$ und $y \equiv y' \pmod{m}$, so ist auch

$$x \pm y \equiv x' \pm y' \pmod{m} \quad \text{und} \quad x'y' \equiv xy \pmod{m}.$$

Beweis: Sind $x - x'$ und $y - y'$ durch m teilbar, so auch

$$\begin{aligned} (x \pm y) - (x' \pm y') &= (x - x') \pm (y - y') && \text{und} \\ xy - x'y' &= x(y - y') + y'(x - x') && \blacksquare \end{aligned}$$

Im folgenden wollen wir das Symbol „mod“ nicht nur in Kongruenzen wie $x \equiv y \pmod{m}$ benutzen, sondern auch – wie in vielen Programmiersprachen üblich – als Rechenoperation:

Definition: Für eine ganze Zahl x und eine natürliche Zahl m bezeichnet $x \bmod m$ jene ganze Zahl $0 \leq r < m$ mit $x \equiv r \pmod{m}$.

$x \bmod m$ ist also einfach der Divisionsrest bei der Division von x durch m .

Da nach dem gerade bewiesenen Lemma die Addition, Subtraktion und Multiplikation mit Kongruenzen vertauschbar sind, können wir auf der Menge aller Äquivalenzklassen Rechenoperationen einführen. Übersichtlicher wird das, wenn wir statt dessen die Menge

$$\mathbb{Z}/m \stackrel{\text{def}}{=} \{0, 1, \dots, m - 1\}$$

betrachten. Wir definieren eine Addition durch

$$x \oplus y = (x + y) \bmod m = \begin{cases} x + y & \text{falls } x + y < m \\ x + y - m & \text{sonst} \end{cases}$$

und entsprechend eine Multiplikation gemäß

$$x \odot y = (xy) \bmod m.$$

Für $m = 4$ haben wir also folgende Operationen:

\oplus	0	1	2	3		\odot	0	1	2	3
0	0	1	2	3		0	0	0	0	0
1	1	2	3	0	und	1	0	1	2	3
2	2	3	0	1		2	0	2	0	2
3	3	0	1	2		3	0	3	2	1

Um diese Tabellen zu interpretieren, sollten wir uns an einige Grundbegriffe aus der Algebra erinnern:

Definition: a) Eine *Gruppe* ist eine Menge G zusammen mit einer Verknüpfung $\times: G \times G \rightarrow G$, für die gilt

- 1.) $(x \times y) \times z = x \times (y \times z)$ für alle $x, y, z \in G$.
- 2.) Es gibt ein Element $e \in G$, so daß $e \times x = x \times e = x$ für alle $x \in G$.
- 3.) Zu jedem $x \in G$ gibt es ein $x' \in G$, so daß $x \times x' = x' \times x = e$ ist.

Die Gruppe heißt *kommutativ* oder *abelsch*, wenn zusätzlich noch gilt

- 4.) $x \times y = y \times x$ für alle $x, y \in G$.

b) Eine Abbildung $\varphi: G \rightarrow H$ zwischen zwei Gruppen G und H mit Verknüpfungen \times und \otimes heißt (*Gruppen- φ*)*Homomorphismus*, falls für alle $x, y \in G$ gilt: $\varphi(x \times y) = \varphi(x) \otimes \varphi(y)$. Ist φ zusätzlich bijektiv, reden wir von einem *Isomorphismus*. Die Gruppen G und H heißen *isomorph*, in Zeichen $G \cong H$, wenn es einen Isomorphismus $\varphi: G \rightarrow H$ gibt.

c) Ein *Ring* ist eine Menge R zusammen mit zwei Verknüpfungen $+, \cdot: R \times R \rightarrow R$, so daß gilt

- 1.) Bezüglich $+$ ist R eine abelsche Gruppe.
- 2.) $(x \cdot y) \cdot z = x \cdot (y \cdot z)$ für alle $x, y, z \in R$.
- 3.) Es gibt ein Element $1 \in R$, so daß $1 \cdot x = x \cdot 1 = x$ für alle $x \in R$.
- 4.) $x \cdot (y + z) = x \cdot y + x \cdot z$ und $(x + y) \cdot z = x \cdot z + y \cdot z$ für alle $x, y, z \in R$.

Der Ring heißt *kommutativ*, wenn zusätzlich noch gilt

- 5.) $x \cdot y = y \cdot x$ für alle $x, y \in R$.

d) Eine Abbildung $\varphi: R \rightarrow S$ zwischen zwei Ringen heißt (Ring-) *Homomorphismus*, wenn für alle $x, y \in R$ gilt

$$\varphi(r + s) = \varphi(r) + \varphi(s) \quad \text{und} \quad \varphi(r \cdot s) = \varphi(r) \cdot \varphi(s),$$

wobei $+$ und \cdot auf der linken Seite jeweils die Operationen von R bezeichnen und rechts die von S . Auch hier reden wir von einem *Isomorphismus*, wenn φ bijektiv ist, und bezeichnen $R \cong S$ als *isomorph*, wenn es einen Isomorphismus $\varphi: R \rightarrow S$ gibt.

Lemma: Für jedes $m \in \mathbb{N}$ ist \mathbb{Z}/m mit den Operationen \oplus und \odot ein Ring.

Beweis: Wir betrachten die Abbildung

$$\varphi: \begin{cases} \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/m \\ x \mapsto x \bmod m \end{cases}.$$

Nach dem obigen Lemma ist

$$\varphi(x + y) = \varphi(x) \oplus \varphi(y) \quad \text{und} \quad \varphi(xy) = \varphi(x) \odot \varphi(y).$$

Da \mathbb{Z} bezüglich $+$ eine abelsche Gruppe ist, gilt somit dasselbe für \mathbb{Z}/m bezüglich \oplus : Wenn zwei ganze Zahlen gleich sind, sind schließlich auch ihre Divisionsreste modulo m gleich. Das Neutralelement ist $\varphi(0) = 0$, und das additive Inverse ist $\varphi(-x) = m - \varphi(x)$. Auch die Eigenschaften von \odot folgen sofort aus den entsprechenden Eigenschaften der Multiplikation ganzer Zahlen; das Neutralelement ist $\varphi(1) = 1$. ■

Man beachte, daß \mathbb{Z}/m im allgemeinen kein Körper ist: In $\mathbb{Z}/4$ beispielsweise ist $2 \odot 2 = 0$, und in einem Körper kann ein Produkt nur verschwinden, wenn mindestens einer der beiden Faktoren verschwindet.

Im folgenden werden wir die Rechenoperationen in \mathbb{Z}/m einfach mit $+$ und \cdot bezeichnen, wobei jedesmal aus dem Zusammenhang klar sein sollte, ob wir von der Addition und Multiplikation in \mathbb{Z}/m oder der in \mathbb{Z} reden. Der Malpunkt wird dabei, wie üblich, oft weggelassen.

Restklassen werden oft benutzt für Prüfziffern. Bei der internationalen Standardbuchnummer ISBN etwa werden nur die ersten neun Ziffern zur

Identifikation des Buchs benötigt, die zehnte ist eine daraus berechnete Prüfziffer, Sind a_1, \dots, a_9 die ersten zehn Ziffern, so ist

$$a_{10} = \sum_{i=1}^9 i a_i \pmod{11}.$$

Falls $a_{10} = 10$ ist, wird es durch die römische Ziffer X dargestellt.

Die zehnstellige ISBN wird heute zunehmend durch eine dreizehnstellige ersetzt, die mit der *Global Trade Item Number* GTIN (früher *European Article Number* EAN) kompatibel ist. Hier wird die dreizehnte Ziffer a_{13} so aus den ersten zwölf Ziffern berechnet, daß

$$\sum_{i=1}^{13} g_i a_i \equiv 0 \pmod{10} \quad \text{ist mit} \quad g_i = \begin{cases} 1 & \text{falls } i \equiv 1 \pmod{2} \\ 3 & \text{falls } i \equiv 0 \pmod{2} \end{cases}.$$

Üblicherweise geben die ersten Ziffern der GTIN das Land an, in dem der Produzent der Ware sitzt; für Bücher sind die ersten drei Ziffern bislang stets 978, darauf folgen die ersten neun Ziffern der zehnstelligen ISBN und die nach GTIN-Regeln berechnete Prüfziffer. Da die Nummern langsam knapp werden, können auch dreizehnstellige ISBN-Nummern vergeben werden, die mit 979 beginnen; ihnen entspricht dann keine zehnstellige ISBN mehr. Die GTIN ist üblicherweise als Barcode auf Waren zu finden, die dadurch von Scannerkassen identifiziert werden.

Auch die *International Bank Account Number* IBAN arbeitet mit Restklassen als Prüfziffern: Die IBAN beginnt mit einem Länderkennzeichen aus zwei Buchstaben, darauf folgen zwei Prüfziffern und bis zu dreißig sonstige Zeichen, die das Konto identifizieren. Deutschland (Länderkennzeichen DE) verwendet nur achtzehn dieser Stellen; die ersten acht enthalten die Bankleitzahl, die restlichen zehn die gegebenenfalls links mit führenden Nullen aufgefüllte Kontonummer, so daß eine deutsche IBAN aus insgesamt 22 Zeichen besteht. In anderen Ländern gelten andere Regeln; beispielsweise hat eine norwegische IBAN nur 15 Stellen, eine maltesische dagegen 31 und eine aus St. Lucia sogar 32.

Zur Berechnung der Prüfziffern wird das Länderkennzeichen hinten an die IBAN angehängt, dahinter folgen an Stelle der noch unbekannt

Prüfziffern zwei Nullen. In dieser nun mit dem fünften Zeichen beginnenden Zeichenkette werden alle Buchstaben durch Zahlen ersetzt nach dem Schema $A = 10$ bis $Z = 25$; die entstehende Zahl wird modulo 97 reduziert. Die Prüfziffern sind 98 minus dieser Restklasse, geschrieben als zweiziffrige Zahl.

Die Semesterbeiträge der Universität Mannheim müssen beispielsweise einbezahlt werden auf das Konto 1 379 273 bei der LBBW, BLZ 600 501 01. Hier muß die Kontonummer durch drei führende Nullen erweitert werden, so daß man startet mit der Zeichenkette

$$6005\ 0101\ 0001\ 3792\ 73DE\ 00.$$

Einsetzen von $D = 13$ und $E = 14$ macht daraus

$$6005\ 0101\ 0001\ 3792\ 7313\ 1400 \equiv 75 \pmod{97}.$$

$98 - 75 = 23$; die IBAN ist also

$$DE23\ 6005\ 0101\ 0001\ 3792\ 73.$$

Für die Berechnung des Divisionsrest darf man die obige 24-stellige Zahl 6005 0101 0001 3792 7313 1400 natürlich nicht einfach so in den Taschenrechner eingeben; da die meisten Rechner intern mit höchstens dreizehn geltenden Ziffern rechnen, würde sie dabei mit Sicherheit verfälscht. Stattdessen muß man gemäß der in der Schule gelernten Methode dividieren, wobei man als Basis natürlich auch eine größere Zehnerpotenz nehmen kann. Beispielsweise ist

$$6005\ 0101 \equiv 20 \pmod{97}$$

$$\implies 6005\ 0101\ 0001\ 3792\ 7313\ 1400 \equiv 20\ 0001\ 3792\ 7313\ 1400 \pmod{97}$$

$$2000\ 0137 \equiv 95 \pmod{97}$$

$$\implies 20\ 0001\ 3792\ 7313\ 1400 \equiv 9592\ 7313\ 1400 \pmod{97}$$

$$9592\ 7313 \equiv 36 \pmod{97} \implies 9592\ 7313\ 1400 \equiv 36\ 1400 \equiv 75 \pmod{97},$$

so daß man auch durch Rechnen mit maximal achtstelligen Zahlen in wenigen Schritten das Ergebnis erhält.

Eine weitere Anwendung von Kongruenzen sind sogenannte Modulararithmetiken: Beim konkreten Rechnen mit großen Zahlen verwendet man in der Numerik meist Gleitkommaarithmetiken, hat dann aber

das Problem von Rundungsfehlern und eventuell auch numerischer Instabilität. Beim Rechnen modulo einer natürlichen Zahl N hat man stets exakte Ergebnisse, allerdings ist das Ergebnis nur modulo N bestimmt. Falls man weiß, daß es beispielsweise zwischen $-(N-1)/2$ und $(N-1)/2$ liegt, reicht das. Für große N ist allerdings auch das Rechnen modulo N schon recht aufwendig; tatsächlich verwenden daher beispielsweise Computeragebrasysteme bei auf Modulararithmetik beruhenden Algorithmen mehrere paarweise teilerfremde Moduln N_i und rekonstruieren dann das Endergebnis modulo dem Produkt aller N_i . Wie dies geschieht, zeigt der nächste Paragraph.

§7: Der chinesische Restesatz

Der Legende nach zählten chinesische Generäle ihre Truppen, indem sie diese mehrfach antreten ließen in Reihen verschiedener Breiten m_1, \dots, m_r und jedesmal nur die Anzahl a_r der Soldaten in der letzten Reihe zählten. Aus den r Relationen

$$x \equiv a_1 \pmod{m_1}, \quad \dots, \quad x \equiv a_r \pmod{m_r}$$

bestimmten sie dann die Gesamtzahl x der Soldaten.

Ob es im alten China wirklich Generäle gab, die soviel Mathematik konnten, sei dahingestellt; Beispiele zu diesem Satz finden sich jedenfalls bereits 1247 in den chinesischen *Mathematischen Abhandlungen in neun Bänden* von CH'IN CHIU-SHAO (1202–1261), allerdings geht es dort nicht um Soldaten, sondern um Reis.

CH'IN CHIU-SHAO oder QIN JIUSHAO wurde 1202 in der Provinz Sichuan geboren. Auf eine wilde Jugend mit vielen Affären folgte ein wildes und alles andere als gesetztreues Berufsleben in Armee, öffentlicher Verwaltung und illegalem Salzhandel. Als Jugendlicher studierte er an der Akademie von Hang-chou Astronomie, später brachte ihm ein unbekannter Lehrer Mathematik bei. Insbesondere studierte er die in vorchristlicher Zeit entstandenen *Neun Bücher der Rechenkunst*, nach deren Vorbild er 1247 seine deutlich anspruchsvolleren *Mathematischen Abhandlungen in neun Bänden* publizierte, die ihn als einen der bedeutendsten Mathematiker nicht nur Chinas ausweisen. Zum chinesischen Restesatz schreibt er, daß er ihn von den Kalendermachern gelernt habe, diese ihn jedoch nur rein mechanisch anwendeten ohne ihn zu verstehen. CH'IN CHIU-SHAO starb 1261 in Meixian, wohin er nach einer seiner vielen Entlassungen wegen krimineller Machenschaften geschickt worden war.

Wir wollen uns zunächst überlegen, unter welchen Bedingungen ein solches Verfahren überhaupt funktionieren kann. Offensichtlich können die obigen r Relationen eine natürliche Zahl nicht eindeutig festlegen, denn ist x eine Lösung und M irgendein gemeinsames Vielfaches der sämtlichen m_i , so ist $x + M$ auch eine – M ist schließlich modulo aller m_i kongruent zur Null.

Außerdem gibt es Relationen obiger Form, die unlösbar sind, beispielsweise das System

$$x \equiv 2 \pmod{4} \quad \text{und} \quad x \equiv 3 \pmod{6},$$

dessen erste Gleichung nur gerade Lösungen hat, während die zweite nur ungerade hat. Das Problem hier besteht darin, daß zwei ein gemeinsamer Teiler von vier und sechs ist, so daß jede der beiden Kongruenzen auch etwas über $x \pmod{2}$ aussagt: Nach der ersten ist x gerade, nach der zweiten aber ungerade.

Dieses Problem können wir dadurch umgehen, daß wir nur Moduln m_i zulassen, die paarweise teilerfremd sind. Dies hat auch den Vorteil, daß jedes gemeinsame Vielfache der m_i Vielfaches des Produkts aller m_i sein muß, so daß wir x modulo einer vergleichsweise großen Zahl kennen.

Chinesischer Restesatz: Das System von Kongruenzen

$$x \equiv a_1 \pmod{m_1}, \quad \dots, \quad x \equiv a_r \pmod{m_r}$$

hat für paarweise teilerfremde Moduln m_i genau eine Lösung x mit $0 \leq x < m_1 \cdots m_r$. Jede andere Lösung $y \in \mathbb{Z}$ läßt sich in der Form $x + km_1 \cdots m_r$ schreiben mit $k \in \mathbb{Z}$.

Mit den Begriffen aus dem vorigen Paragraphen läßt sich dies auch anders formulieren: Die Zahl $x \pmod{m_i}$ können wir auffassen als Element von \mathbb{Z}/m_i , das r -Tupel aus allen diesen Zahlen also als Element von $\mathbb{Z}/m_1 \times \cdots \times \mathbb{Z}/m_r$. Man überlegt sich leicht, daß das kartesische Produkt von zwei oder mehr Gruppen wieder eine Gruppe ist: Die Verknüpfung wird einfach komponentenweise definiert, und das Neutralelement ist dasjenige Tupel, dessen sämtliche Komponenten Neutralelemente der jeweiligen Faktoren sind. Genauso folgt, daß das kartesische Produkt von zwei oder mehr Ringen wieder ein Ring ist.

In algebraischer Formulierung haben wir dann die folgende Verschärfung des obigen Satzes:

Chinesischer Restesatz (Algebraische Form): Die Abbildung

$$\varphi: \begin{cases} \mathbb{Z}/m_1 \cdots m_r \rightarrow \mathbb{Z}/m_1 \times \cdots \times \mathbb{Z}/m_r \\ x \mapsto (x \bmod m_1, \dots, x \bmod m_r) \end{cases}$$

ist ein Isomorphismus von Ringen.

Wir *beweisen* den Satz in dieser algebraischen Form:

Zunächst ist

$$\psi: \begin{cases} \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/m_1 \times \cdots \times \mathbb{Z}/m_r \\ x \mapsto (x \bmod m_1, \dots, x \bmod m_r) \end{cases}$$

ein Ringhomomorphismus, denn nach dem Lemma aus dem vorigen Paragraphen ist der Übergang zu den Restklassen modulo jeder der Zahlen m_i mit Addition und Multiplikation vertauschbar. Da $\psi(x)$ nur von $x \bmod m_1 \cdots m_r$ abhängt, folgt daraus, daß auch φ ein Ringhomomorphismus ist.

φ ist injektiv, denn ist $\varphi(x) = \varphi(y)$, so ist $x \bmod m_i = y \bmod m_i$ für alle i ; da die m_i paarweise teilerfremd sind, ist $x - y$ somit durch das Produkt der m_i teilbar, was für $x, y \in \mathbb{Z}/m_1 \cdots m_r$ nur im Fall $x = y$ möglich ist.

Nun ist φ aber eine Abbildung zwischen endlichen Mengen, die beide aus je $m_1 \cdots m_r$ Elementen bestehen. Jede injektive Abbildung zwischen zwei gleichmächtigen endlichen Mengen ist zwangsläufig auch surjektiv, also bijektiv, und somit ist φ ein Isomorphismus. ■

Aus Sicht der chinesischen Generäle ist dieser Beweis enttäuschend: Angenommen, ein General weiß, daß höchstens Tausend Soldaten vor ihm stehen. Er läßt sie in Zehnerreihen antreten; in der letzten Reihe stehen fünf Soldaten. Bei Elferreihen sind es neun, bei Dreizehnerreihen sechs. Da $10 \cdot 11 \cdot 13 = 1430$ größer ist als Tausend, weiß er, daß dies die Anzahl eindeutig festlegt. Er weiß aber nicht, wie viele Soldaten nun tatsächlich vor ihm stehen. Als General hat er natürlich die

Möglichkeit, einige Soldaten abzukommandieren, die für jede Zahl bis Tausend die Divisionsreste modulo 9, 10 und 13 berechnen müssen, bis sie auf das Tripel (5, 9, 6) stoßen. Wir als Mathematiker sollten jedoch eine effizientere Methode finden.

Dazu verhilft uns der erweiterte EUKLIDISCHE Algorithmus:

Wir beginnen mit dem Fall zweier Kongruenzen

$$x \equiv a \pmod{m} \quad \text{und} \quad y \equiv b \pmod{n}$$

mit zueinander teilerfremden Zahlen m und n . Ihr ggT eins läßt sich nach dem erweiterten EUKLIDISCHEN Algorithmus als $1 = \alpha m + \beta n$ schreiben. Somit ist

$$1 - \alpha m = \beta n \equiv \begin{cases} 1 & \pmod{m} \\ 0 & \pmod{n} \end{cases} \quad \text{und} \quad 1 - \beta n = \alpha m \equiv \begin{cases} 0 & \pmod{m} \\ 1 & \pmod{n} \end{cases},$$

also löst

$$x = \beta n a + \alpha m b \equiv \begin{cases} a & \pmod{m} \\ b & \pmod{n} \end{cases}$$

das Problem.

x ist natürlich nicht die einzige Lösung; wenn wir ein gemeinsames Vielfaches von m und n addieren, ändert sich nichts an den Kongruenzen. Da wir von teilerfremden Zahlen ausgegangen sind, ist das Produkt das kleinste gemeinsame Vielfache; die allgemeine Lösung ist daher

$$x + (\beta n + \lambda b)a + (\alpha m - \lambda a)b.$$

Insbesondere ist die Lösung eindeutig modulo nm .

Als Beispiel betrachten wir die beiden Kongruenzen

$$x \equiv 1 \pmod{17} \quad \text{und} \quad x \equiv 5 \pmod{19}.$$

Wir müssen als erstes den erweiterten EUKLIDISCHEN Algorithmus auf die beiden Moduln 17 und 19 anwenden:

$$19 : 17 = 1 \text{ Rest } 2 \implies 2 = 19 - 17$$

$$17 : 2 = 8 \text{ Rest } 1 \implies 1 = 17 - 8 \cdot 2 = 9 \cdot 17 - 8 \cdot 19$$

Also ist $9 \cdot 17 = 153 \equiv 0 \pmod{17}$ und $\equiv 1 \pmod{19}$; außerdem ist $-8 \cdot 19 = -152$ durch 19 teilbar und $\equiv 1 \pmod{17}$. Die Zahl

$$x = -152 \cdot 1 + 153 \cdot 5 = 613$$

löst somit das Problem. Da 613 größer ist als $17 \cdot 19 = 323$, ist allerdings nicht 613 die kleinste positive Lösung, sondern $613 - 323 = 290$.

Bei mehr als zwei Kongruenzen gehen wir rekursiv vor: Wir lösen die ersten beiden Kongruenzen $x \equiv a_1 \pmod{m_1}$ und $x \equiv a_2 \pmod{m_2}$ wie gerade besprochen; das Ergebnis ist eindeutig modulo $m_1 m_2$. Ist c_2 eine feste Lösung, so läßt sich die Lösung schreiben als Kongruenz

$$x \equiv c_2 \pmod{m_1 m_2},$$

und da die m_i paarweise teilerfremd sind, ist auch $m_1 m_2$ teilerfremd zu m_3 . Mit EUKLID können wir daher das System

$$x \equiv c_2 \pmod{m_1 m_2} \quad \text{und} \quad x \equiv a_3 \pmod{m_3}$$

lösen und die Lösung schreiben als

$$x \equiv c_3 \pmod{m_1 m_2 m_3}$$

und so weiter, bis wir schließlich x modulo dem Produkt aller m_i kennen und somit das Problem gelöst haben.

Im Beispiel des oben angesprochenen Systems

$$x \equiv 5 \pmod{10}, \quad x \equiv 9 \pmod{11}, \quad x \equiv 6 \pmod{13}$$

lösen wir also zunächst nur das System

$$x \equiv 5 \pmod{10} \quad \text{und} \quad x \equiv 9 \pmod{11}.$$

Da $1 = 11 - 10$, ist $11 \equiv 0 \pmod{11}$ und $11 \equiv 1 \pmod{10}$; entsprechend ist $-10 \equiv 0 \pmod{10}$ und $-10 \equiv 1 \pmod{11}$. Also ist

$$x = 5 \cdot 11 - 9 \cdot 10 = -35$$

eine Lösung; die allgemeine Lösung ist $-35 + 110k$ mit $k \in \mathbb{Z}$. Die kleinste positive Lösung ist $-35 + 110 = 75$.

Unser Ausgangssystem ist somit äquivalent zu den beiden Kongruenzen

$$x \equiv 75 \pmod{110} \quad \text{und} \quad x \equiv 6 \pmod{13}.$$

Um es zu lösen, müssen wir zunächst die Eins als Linearkombination von 110 und 13 darstellen. Hier bietet sich keine offensichtliche Lösung an, also verwenden wir den erweiterten EUKLIDischen Algorithmus:

$$110 : 13 = 8 \text{ Rest } 6 \implies 6 = 110 - 8 \cdot 13$$

$$13 : 6 = 2 \text{ Rest } 1 \implies 1 = 13 - 2 \cdot 6 = 17 \cdot 13 - 2 \cdot 110$$

Also ist $17 \cdot 13 = 221 \equiv 1 \pmod{110}$ und $\equiv 0 \pmod{13}$; genauso ist $-2 \cdot 110 = 220 \equiv 1 \pmod{13}$ und $\equiv 9 \pmod{110}$. Eine ganzzahlige Lösung unseres Problems ist somit

$$75 \cdot 221 - 6 \cdot 220 = 15\,255.$$

Die allgemeine Lösung ist

$$15\,255 + k \cdot 110 \cdot 13 = 15\,255 + 1\,430k \quad \text{mit } k \in \mathbb{Z}.$$

Da $15\,255 : 1\,430 = 10$ Rest 955 ist, hatte der General also 955 Soldaten vor sich stehen.

Alternativ läßt sich die Lösung eines Systems aus r Kongruenzen auch in einer geschlossenen Form darstellen allerdings um den Preis einer n -maligen statt $(n - 1)$ -maligen Anwendung des EUKLIDischen Algorithmus und größeren Zahlen schon von Beginn an: Um das System

$$x \equiv a_i \pmod{m_i} \quad \text{für } i = 1, \dots, r$$

zu lösen, berechnen wir zunächst für jedes i das Produkt

$$\widehat{m}_i = \prod_{j \neq i} m_j$$

der sämtlichen übrigen m_j und bestimmen dazu ganze Zahlen α_i, β_i , für die gilt $\alpha_i m_i + \beta_i \widehat{m}_i = 1$ Dann ist

$$x = \sum_{j=1}^n \beta_j \widehat{m}_j a_j \equiv \beta_i \widehat{m}_i a_i = (1 - \alpha_i m_i) a_i \equiv a_i \pmod{m_i}.$$

Natürlich wird x hier – wie auch bei der obigen Formel – oft größer sein als das Produkt der m_i ; um die kleinste Lösung zu finden, müssen wir also noch modulo diesem Produkt reduzieren.

Im obigen Beispiel wäre

$$\begin{aligned} m_1 = 10 & \quad \widehat{m}_1 = 11 \cdot 13 = 143 & \quad 1 = 43 \cdot 10 - 3 \cdot 143 \\ m_2 = 11 & \quad \widehat{m}_2 = 10 \cdot 13 = 130 & \quad 1 = -59 \cdot 11 + 5 \cdot 130 \\ m_3 = 13 & \quad \widehat{m}_3 = 10 \cdot 11 = 110 & \quad 1 = 17 \cdot 13 - 2 \cdot 110, \end{aligned}$$

also

$$x = -3 \cdot 143 \cdot 5 + 5 \cdot 130 \cdot 9 - 2 \cdot 110 \cdot 6 = -2145 + 5850 - 1320 = 2385.$$

Modulo $10 \cdot 11 \cdot 13$ erhalten wir natürlich auch hier wieder 955.

Damit kennen wir nun auch zwei konstruktive Beweise des chinesischen Restesatzes und wissen, wie man Systeme von Kongruenzen mit Hilfe des erweiterten EUKLIDischen Algorithmus lösen kann.

§8: Prime Restklassen

Wie wir gesehen haben, können wir auch in \mathbb{Z}/m im allgemeinen nicht dividieren. Allerdings ist Division doch sehr viel häufiger möglich als in den ganzen Zahlen. Dies wollen wir als nächstes genauer untersuchen:

Lemma: Zu zwei gegebenen natürlichen Zahlen a, m gibt es genau dann ein $x \in \mathbb{N}$ mit $ax \equiv 1 \pmod{m}$, wenn $\text{ggT}(a, m) = 1$ ist.

Beweis: Wenn es ein solches x gibt, gibt es dazu ein $y \in \mathbb{N}$, so daß $ax = 1 + my$, d.h. $1 = ax - my$. Damit muß jeder gemeinsame Teiler von a und m Teiler der Eins sein, a und m sind also teilerfremd.

Sind umgekehrt a und m teilerfremd, so gibt es nach dem erweiterten EUKLIDischen Algorithmus $x, y \in \mathbb{Z}$ mit $ax + my = 1$. Durch (gegebenenfalls mehrfache) Addition der Gleichung $am - ma = 0$ läßt sich nötigenfalls erreichen, daß x positiv wird, und offensichtlich ist $ax \equiv 1 \pmod{m}$. ■

Definition: Ein Element $a \in \mathbb{Z}/m$ heißt prime Restklasse, wenn $\text{ggT}(a, m) = 1$ ist.

Nach dem gerade bewiesenen Lemma gibt es somit zu jeder primen Restklasse a ein $x \in \mathbb{Z}/m$, so daß dort $ax = 1$ ist. Damit ist das folgende Lemma nicht verwunderlich:

Lemma: Die primen Restklassen aus \mathbb{Z}/m bilden bezüglich der Multiplikation eine Gruppe.

Beweis: Wir müssen uns zunächst überlegen, daß das Produkt zweier primen Restklassen wieder eine prime Restklasse ist. Sind $a, b \in \mathbb{Z}/m$ beide teilerfremd zu m , so auch ab , denn wäre p ein gemeinsamer

Primteiler von ab und m , so wäre p als Primzahl auch Teiler von a oder b , also gemeinsamer Teiler von a und m oder von b und m . Die Eins ist natürlich eine prime Restklasse, und auch die Existenz von Inversen ist kein Problem: Nach dem vorigen Lemma gibt es ein $x \in \mathbb{Z}$, so daß $ax \equiv 1 \pmod{m}$ ist, und die andere Richtung dieses Lemmas zeigt, daß auch $x \pmod{m}$ eine prime Restklasse ist. Das Assoziativgesetz der Multiplikation gilt für alle Elemente von \mathbb{Z}/m , erst recht also für die primen Restklassen. ■

Definition: Die Gruppe $(\mathbb{Z}/m)^\times$ der primen Restklassen heißt *prime Restklassengruppe*, ihre Ordnung wird mit $\varphi(m)$ bezeichnet. $\varphi : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ heißt EULERSche φ -Funktion.



LEONHARD EULER (1707–1783) wurde in Basel geboren. Er ging auch dort zur Schule und, im Alter von 14 Jahren, zur Universität. Zwei Jahre später legte er die Magisterprüfung in Philosophie ab und begann mit dem Studium der Theologie; daneben hatte er sich seit Beginn seines Studium unter Anleitung von JOHANN BERNOULLI mit Mathematik beschäftigt. 1726 beendete er sein Studium in Basel und bekam eine Stelle an der Petersburger Akademie der Wissenschaften, die er 1727 antrat. Auf Einladung FRIEDRICHS DES GROSSEN wechselte er 1741 an die preußische Akademie der Wissenschaften. Nachdem sich das Verhältnis zwischen den beiden dramatisch verschlechtert hatte, kehrte er 1766 nach St. Petersburg zurück. Im gleichen Jahr erblindete er vollständig; trotzdem schrieb er rund die Hälfte seiner zahlreichen Arbeiten (Seine gesammelten Abhandlungen umfassen 73 Bände) danach. Sie enthalten bedeutende Beiträge zu zahlreichen Teilgebieten der Mathematik, Physik, Astronomie und Kartographie.

beiden dramatisch verschlechtert hatte, kehrte er 1766 nach St. Petersburg zurück. Im gleichen Jahr erblindete er vollständig; trotzdem schrieb er rund die Hälfte seiner zahlreichen Arbeiten (Seine gesammelten Abhandlungen umfassen 73 Bände) danach. Sie enthalten bedeutende Beiträge zu zahlreichen Teilgebieten der Mathematik, Physik, Astronomie und Kartographie.

Lemma: a) Für zwei zueinander teilerfremde Zahlen $n, m \in \mathbb{N}$ ist $\varphi(nm) = \varphi(n)\varphi(m)$.

b) Für $m = \prod_{i=1}^r p_i^{e_i}$ ist $\varphi(m) = \prod_{i=1}^r (p_i^{e_i-1}(p_i - 1))$.

Beweis: a) Eine Zahl a ist genau dann teilerfremd zum Produkt nm , wenn $a \pmod{n}$ teilerfremd zu n und $a \pmod{m}$ teilerfremd zu m ist. Da nach dem chinesischen Restesatz $\mathbb{Z}/nm \cong \mathbb{Z}/n \times \mathbb{Z}/m$ ist, ist daher auch $(\mathbb{Z}/nm)^\times \cong (\mathbb{Z}/n)^\times \times (\mathbb{Z}/m)^\times$.

b) Wegen a) genügt es, dies für Primzahlpotenzen p^e zu beweisen. Eine Zahl a ist genau dann teilerfremd zu p^e , wenn sie kein Vielfaches von p ist. Unter den Zahlen von 1 bis p^e gibt es genau p^{e-1} Vielfache von p , also ist $\varphi(p^e) = p^e - p^{e-1} = p^{e-1}(p - 1)$. ■

Korollar: \mathbb{Z}/m ist genau dann ein Körper, wenn m eine Primzahl ist.

Beweis: Das einzige, was \mathbb{Z}/m zu einem Körper eventuell fehlt, ist die Existenz von multiplikativen Inversen für alle von null verschiedenen Elemente. Dies ist offenbar äquivalent zur Formel $\varphi(m) = m - 1$, und die gilt nach dem Lemma genau dann, wenn m prim ist. ■

Der Körper \mathbb{Z}/p mit p Elementen wird üblicherweise mit \mathbb{F}_p bezeichnet; die zugehörige prime Restklassengruppe $(\mathbb{Z}/p)^\times = \mathbb{F}_p \setminus \{0\}$ entsprechend als \mathbb{F}_p^\times . Dabei steht das „ \mathbb{F} “ für *finit*. Im Englischen werden endliche Körper gelegentlich auch als *Galois fields* bezeichnet, so daß man hier auch die Abkürzung $\text{GF}(p)$ sieht. *Field* ist das englische Wort für Körper; das gelegentlich in Informatikbüchern zu lesende Wort *Galoisfeld* ist also ein Übersetzungsfehler.

Wir wollen uns als nächstes überlegen, daß die multiplikative Gruppe dieses Körpers aus den Potenzen eines einzigen Elements besteht. Dazu brauchen wir zunächst noch ein Lemma aus der Gruppentheorie:

Definition: Die Ordnung eines Elements a einer (multiplikativ geschriebenen) Gruppe G ist die kleinste natürliche Zahl r , für die a^r gleich dem Einselement ist. Falls es keine solche Zahl gibt, sagen wir, a habe unendliche Ordnung.

Lemma (LAGRANGE): In einer endlichen Gruppe teilt die Ordnung eines jeden Elements die Gruppenordnung.

Beweis: Die Potenzen des Elements a bilden zusammen mit der Eins eine Untergruppe H von G , deren Elementanzahl gerade die Ordnung r von H ist. Wir führen auf G eine Äquivalenzrelation ein durch die Vorschrift $g \sim h$, falls gh^{-1} in H liegt. Offensichtlich besteht die

Äquivalenzklasse eines jeden Elements $g \in G$ aus genau r Elementen, nämlich g, ga, \dots, ga^{r-1} . Da G die Vereinigung aller Äquivalenzklassen ist, muß die Gruppenordnung somit ein Vielfaches von r sein. ■



JOSEPH-LOUIS LAGRANGE (1736–1813) wurde als GIUSEPPE LODOVICO LAGRANGIA in Turin geboren und studierte dort zunächst Latein. Erst eine alte Arbeit von HALLEY über algebraische Methoden in der Optik weckte sein Interesse an der Mathematik, woraus ein ausgedehnter Briefwechsel mit EULER entstand. In einem Brief vom 12. August 1755 berichtete er diesem unter anderem über seine Methode zur Berechnung von Maxima und Minima; 1756 wurde er, auf EULERS Vorschlag, Mitglied der Berliner Akademie; zehn Jahre später zog er nach Berlin und wurde dort EULERS Nachfolger als mathematischer Direktor der

Akademie. 1787 wechselte er an die Pariser Académie des Sciences, wo er bis zu seinem Tod blieb und unter anderem an der Einführung des metrischen Systems beteiligt war. Seine Arbeiten umspannen weite Teile der Analysis, Algebra und Geometrie.

Korollar: Für zwei zueinander teilerfremde Zahlen a, m ist

$$a^{\varphi(m)} \equiv 1 \pmod{m}.$$

Beweis: Klar, denn $\varphi(m)$ ist die Ordnung der primen Restklassengruppe modulo m . ■

Für eine Primzahl $N = p$ bezeichnet man diese Aussage auch als den *kleinen Satz von FERMAT*:

Satz (FERMAT): Für jede nicht durch die Primzahl p teilbare ganze Zahl a ist $a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$. Für alle $a \in \mathbb{Z}$ ist $a^p \equiv a \pmod{p}$.

Beweis: Die erste Aussage ist klar, da $\varphi(p) = p - 1$ ist. Für die zweite müssen wir nur noch beachten, daß für durch p teilbare Zahlen a sowohl a^p als auch a kongruent null modulo p sind. ■



Der französische Mathematiker PIERRE DE FERMAT (1601–1665) wurde in Beaumont-de-Lomagne im Département Tarn et Garonne geboren. Bekannt ist er heutzutage vor allem für seine 1637 von ANDREW WILES bewiesene Vermutung, wonach die Gleichung $x^n + y^n = z^n$ für $n \geq 3$ keine ganzzahlige Lösung mit $xyz \neq 0$ hat. Dieser „große“ Satz von FERMAT, von dem FERMAT lediglich in einer Randnotiz behauptete, daß er ihn beweisen könne, erklärt den Namen der obigen Aussage. Obwohl FERMAT sich sein Leben lang sehr mit Mathematik beschäftigte und wesentliche Beiträge zur Zahlentheorie, Wahrscheinlichkeitstheorie und Analysis lieferte, war er hauptberuflich Jurist.

Satz: Die multiplikative Gruppe eines endlichen Körpers ist zyklisch.

Beweis: Da die multiplikative Gruppe eines Körpers mit q Elementen aus allen Körperelementen außer der Null besteht, hat sie die Ordnung $q - 1$, d.h. nach LAGRANGE ist die Ordnung eines jeden Elements ein Teiler von $q - 1$. Wir müssen zeigen, daß es mindestens ein Element gibt, dessen Ordnung *genau* $q - 1$ ist.

Für jeden Primteiler p_i von $q - 1$ hat die Polynomgleichung

$$x^{(q-1)/p_i} = 1$$

höchstens $(q - 1)/p_i$ Lösungen im Körper; es gibt also zu jedem p_i ein Körperelement a_i mit $a_i^{(q-1)/p_i} \neq 1$.

q_i sei die größte Potenz von p_i , die $q - 1$ teilt, und $g_i = a_i^{(q-1)/q_i}$ die $(q - 1)/q_i$ -te Potenz von a_i . Dann ist

$$g_i^{q_i} = a_i^{q-1} = 1 \quad \text{und} \quad g_i^{\frac{q_i}{p_i}} = a_i^{\frac{q-1}{p_i}} \neq 1;$$

g_i hat also die Ordnung q_i . Da die verschiedenen q_i Potenzen verschiedener Primzahlen p_i sind, hat daher das Produkt g aller g_i das Produkt aller q_i als Ordnung, also $q - 1$. Damit ist die multiplikative Gruppe des Körpers zyklisch. ■

Definition: Ein Element g eines endlichen Körpers k heißt *primitive Wurzel*, wenn es die zyklische Gruppe k^\times erzeugt.

Selbst im Fall der Körper \mathbb{F}_p gibt es keine Formel, mit der man eine solche primitive Wurzel explizit in Abhängigkeit von p angeben kann. Üblicherweise wählt man zufällig ein Element aus und testet, ob es die Ordnung $p - 1$ hat. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist offenbar $\varphi(p - 1) : (p - 1)$, was für die meisten Werte von p recht gut ist. Der Test, ob die Ordnung gleich $p - 1$ ist, läßt sich allerdings nur dann effizient durchführen, wenn die Primteiler p_i von $p - 1$ bekannt sind, denn dann kann man einfach testen, ob alle Potenzen mit den Exponenten $(p - 1)/p_i$ von eins verschieden sind. Für große Werte von p , wie sie in der Kryptographie benötigt werden, kann dies ein Problem sein, so daß man hier im allgemeinen von faktorisierten Zahlen r ausgeht und dann testet, ob $r + 1$ prim ist. Im Kapitel über Primzahlen werden wir geeignete Tests kennenlernen.