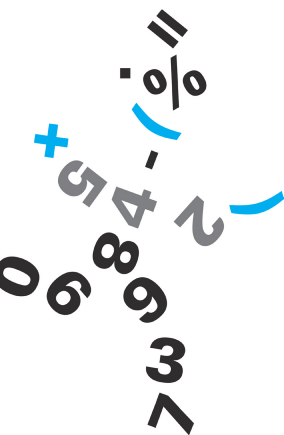
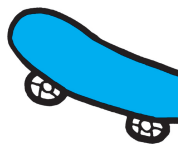


Albrecht Beutelspachers
Kleines Mathematikum



GOLDMANN

Lesen erleben



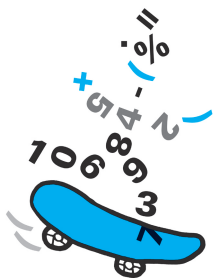
Buch

Das erste mathematische Mitmachmuseum der Welt steht in Gießen, und jährlich überzeugen sich dort über 150.000 Besucher davon, dass Mathematik alles andere ist als langweilig. Zwischen Knobelspielen, Goldenem Schnitt und mathematischen Phänomenen kommen zahlreiche Fragen auf: Was ist überhaupt Mathematik? Seit wann gibt es sie? Und warum ist Mathematik so abstrakt? Auch alltäglichere Probleme warten auf ihre mathematische Lösung: Warum macht Mathematik Angst? Wie groß ist die Chance, einen Sechser im Lotto zu tippen? Warum gibt es keinen Nobelpreis für Mathematik? Und andere Fragen gehen weit über unseren Alltag hinaus: Kann man die Existenz Gottes beweisen? Können Außerirdische unsere Mathematik verstehen? Brauchen Mathematiker Intuition und Fantasie?

Albrecht Beutelspacher hat es sich zur Aufgabe gemacht, die vielen Fragen der kleinen und großen Museumsbesucher so verständlich wie möglich zu beantworten. Für alle, die sich die Antworten nicht persönlich in Gießen abholen können, beantwortet Beutelspacher die 101 interessantesten, originellsten und meistgestellten Fragen in seinem «Kleinen Mathematikum» – wie immer verständlich, nachvollziehbar und unterhaltsam!

Autor

Albrecht Beutelspacher, geb. 1950, ist seit 1988 Professor für Geometrie und Diskrete Mathematik am Mathematischen Institut der Universität Gießen. Das von ihm gegründete Mathematikum, dem er seit 2002 als Direktor vorsteht, ist das erste mathematische Mitmachmuseum. Für seine Vermittlungsbemühungen in Sachen Mathematik wurde er vielfach ausgezeichnet, u.a. mit dem Communicator-Preis des Stifterverbands für die Deutsche Wissenschaft, dem Deutschen IQ-Preis und dem Hessischen Kulturpreis. Beutelspacher ist bekannt für die unterhaltsame und anschauliche Vermittlung seines Fachgebiets und begeistert damit nicht nur seine Studierenden, sondern auch die Leser seiner Bücher. Mit «Wie man durch eine Postkarte steigt» und «Kleines Mathematikum» eroberte er die Bestsellerlisten.



Albrecht
Beutelspachers
Kleines
Mathematikum

Die 101 wichtigsten Fragen
und Antworten zur Mathematik

GOLDMANN

Mit 10 Abbildungen im Text

Einige der Antworten wurden bereits
unter dem Titel «Fragen an die Mathematik»
im Hessischen Rundfunk (hr4) gesendet.



Verlagsgruppe Random House FSC-DEU-0100
Das FSC®-zertifizierte Papier *Holmen Book Cream* für dieses Buch
liefert Holmen Paper, Hallstavik, Schweden.

1. Auflage

Taschenbuchausgabe Dezember 2011
Wilhelm Goldmann Verlag, München,
in der Verlagsgruppe Random House GmbH
Copyright © der Originalausgabe 2010
by Verlag C.H. Beck oHG, München
Umschlaggestaltung: UNO Werbeagentur, München,
in Anlehnung an die Gestaltung der Originalausgabe
(www.kunst-oder-reklame.de)

Autorenfoto: Christoph Mukherjee

KF · Herstellung: Str.

Druck und Bindung: CPI – Clausen & Bosse, Leck

Printed in Germany

ISBN: 978-3-442-15700-6

www.goldmann-verlag.de



Inhalt

Vorwort 11

Grundlagen

1. Was ist Mathematik? 13
2. Seit wann gibt es Mathematik? 15
3. Welches ist das erste Mathematikbuch? 17
 4. Was ist ein Punkt? 19
 5. Was ist ein Beweis? 20
 6. Was sind Axiome? 22
7. Wie kann man beweisen, dass etwas nicht existiert? 24
 8. Ist Mathematik eine Natur- oder eine Geisteswissenschaft? 26
 9. Warum ist Mathematik so abstrakt? 26
10. Hat Pythagoras den Satz des Pythagoras erfunden? 28

Zahlen

11. Welches ist die älteste Zahl? 30
12. Seit wann kann man mit Zahlen rechnen? 32
 13. Wie rechneten die Ägypter? 33
 14. Wie rechneten die Römer? 35
 15. Seit wann gibt es die Null? 38
 16. Ist Null eine gerade Zahl? 39

17. Warum darf man nicht durch null teilen? 40
18. Warum müssen wir das kleine Einmaleins lernen? 41
19. Wie viel ist eine Million Billionen? 43
20. Was ist ein Googol? 44
21. Was ist das Binärsystem? 45
22. Gibt es unendlich viele Zahlen? 46
23. Warum ist $2+2=4$? 47
24. Wie viele Primzahlen gibt es? 49
25. Gibt es eine Formel für Primzahlen? 51
26. Was ist $\frac{1}{2}+\frac{1}{3}$? 52
27. Wie viele Bruchzahlen gibt es? 54
28. Gibt es irrationale Zahlen? 55
29. Wie viele irrationale Zahlen gibt es? 57
30. Was ist Fermats letzter Satz? 59
31. Wozu braucht man komplexe Zahlen? 62

Formen und Muster

32. Welches sind die unlösbaren Probleme der Antike? 65
33. Funktioniert die Quadratur des Kreises? 67
34. Was bedeutet der Satz des Pythagoras? 69
35. Wie groß ist ein DIN-A4-Papier? 71
36. Ist jedes Viereck ein Quadrat? 73
37. Welche Vielecke passen zusammen? 74
38. Warum passen Kreise beziehungsweise Kugeln nicht gut zusammen? 76
39. Warum verwenden Bienen für die Waben Sechsecke? 77
40. Warum gibt es nur fünf platonische Körper? 78



- 41. Schneiden sich Parallelen im Unendlichen? 81
- 42. Was ist nichteuklidische Geometrie? 82
- 43. Warum ist Symmetrie schön? 84
- 44. Wie kommen Zahlen in den Raum? 85
- 45. Kann man sich den vierdimensionalen Raum vorstellen? 87

Formeln

- 46. Was ist $1+2+3+\dots+100$? 90
- 47. Wie viele Reiskörner liegen auf dem Schachbrett? 91
- 48. Ein Euro an Christi Geburt – was ist der heute wert? 92
- 49. Warum ist minus mal minus gleich plus? 93
- 50. Wozu sind die binomischen Formeln gut? 96
- 51. Was bedeutet «Wurzel»? 98
- 52. Kann man jede Gleichung lösen? 99
- 53. Was sind transzendente Zahlen? 100

Zufall

- 54. Wie hat die Wahrscheinlichkeitsrechnung begonnen? 102
- 55. Wenn ich zehnmal würfle, habe ich dann garantiert eine Sechs? 104
- 56. Wie groß ist die Chance, einen Sechser im Lotto zu tippen? 106
- 57. Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Menschen am gleichen Tag Geburtstag haben? 108
- 58. Was ist das Ziegenproblem? 109
- 59. Wie zählt man Fische, ohne sie zu fangen? 111

Infinitesimal

60. Wann holt Achilles die Schildkröte ein? 113
61. Ist $0,999\dots=1$? 114
62. Kann man unendlich viele Zahlen addieren? 116
63. Wie kann man Bewegung mathematisch verstehen? 118
64. Was ist die Exponentialfunktion? 120
65. Wozu sind Logarithmen gut? 122
66. Wie viel muss man von einer Funktion wissen, um sie ganz zu kennen? 124

Anwendungen

67. Wo wird Mathematik angewandt? 126
68. Ist Mathematik eine Kriegswissenschaft? 128
69. Gibt es eine Formel, mit der man Ostern ausrechnen kann? 130
70. Hat der Computer die Mathematik verändert? 132
71. Kann man die Schwierigkeit mathematischer Probleme messen? 134
72. Ist Überprüfen einfacher als Probleme lösen? 136
73. (Wie) hängen Mathematik und Musik zusammen? 138

Probleme

74. Gibt es in der Mathematik noch etwas zu erforschen? 141
75. Warum sind Probleme wichtig? 142
76. Was sind Hilberts Probleme? 144
77. Was sind die 1-Million-Dollar-Probleme? 146
78. Was ist das $(3n+1)$ -Problem? 147
79. Kann man alles beweisen? 149
80. Ist die Mathematik widerspruchsfrei? 151



Mathematiker

- 81. Warum können Mathematiker nicht rechnen? 154
- 82. (Warum) sind Mathematiker weltfremd? 155
- 83. Wer ist der größte Mathematiker aller Zeiten? 157
- 84. Wer ist der größte deutsche Mathematiker? 158
- 85. Sind Frauen mathematisch unbegabt? 160
- 86. Warum gibt es keinen Nobelpreis für Mathematik? 161
- 87. Was ist Hilberts Hotel? 162
- 88. Brauchen Mathematiker Intuition und Fantasie? 164

Lehren und lernen

- 89. Warum muss man Mathematik lernen? 167
- 90. Warum macht Mathematik Angst? 168
- 91. Warum ist Mathematik so schwierig? 169
- 92. Müssen Formeln sein? 171
- 93. Gibt es einen «Königsweg» zur Mathematik? 172
- 94. Warum ist Mathematik so schwer zu lernen? 173

Daneben und darüber hinaus

- 95. Ist 13 eine Unglückszahl? 176
- 96. Haben Zahlen eine Bedeutung? 177
- 97. Können Tiere zählen? 180
- 98. Welches ist die schönste Formel? 181
- 99. Kann man die Existenz Gottes beweisen? 183
- 100. Werden mathematische Erkenntnisse entdeckt oder erfunden? 185
- 101. Können Außerirdische unsere Mathematik verstehen? 187

Vorwort

Das Mathematikum in Gießen ist ein mathematisches «Mitmachmuseum», das seit seiner Eröffnung im Jahr 2002 jährlich 150 000 Besucher jedes Alters anzieht. Diese vergnügen sich an den 150 Stationen, wo sie Knobelspiele lösen, mit Seifenhäuten experimentieren oder an sich selbst den Goldenen Schnitt entdecken. Fast automatisch lernen sie dabei mathematische Phänomene kennen, sie bilden sich Vorstellungen, und sie bekommen Einsichten.

Obwohl das Mathematikum ohne Gleichungen und Formeln auskommt, obwohl die Geschichte der Mathematik kaum thematisiert wird und obwohl es praktisch keine verbalen Erklärungen gibt, werden offenbar durch das Experimentieren bei vielen Besuchern Fragen angeregt. Jedenfalls werde ich häufig persönlich angesprochen, manche Menschen schreiben mir eine Mail und einige auch ganz traditionell einen Brief.

Die Fragen, die mir gestellt werden, sind in jeder Hinsicht bunt gemischt.

Manche Fragen sind mathematischer Natur: Wie groß ist die Chance, einen Sechser im Lotto zu tippen? Wie viele Reiskörner liegen auf dem Schachbrett? Was ist Fermats letzter Satz?

Es gibt Fragen zur Geschichte der Mathematik: Seit wann gibt es die Null? Warum gibt es keinen Nobelpreis für Mathematik? Was sind Hilberts Probleme?

Manche Fragen sind einfach zu beantworten: Wie groß ist



ein DIN-A4-Papier? Ist 13 eine Unglückszahl? Was ist $\frac{1}{2}$ plus $\frac{1}{3}$?

Andere Fragen sind ausgesprochen schwierig: Kann man alles beweisen? Müssen Formeln sein? Warum ist minus mal minus gleich plus?

Und einige Fragen gehen erheblich über den sicheren Bereich der Mathematik hinaus: Können Außerirdische unsere Mathematik verstehen? Kann man die Existenz Gottes beweisen? Warum können Mathematiker nicht rechnen?

In diesem Buch habe ich meine Antworten aufgeschrieben. Dabei habe ich mich zum einen bemüht, die Fragen ernst zu nehmen. Die Antworten müssen richtig sein, ich kann nicht etwas zusammenphantasieren, sondern muss diese auch als Wissenschaftler verantworten können. Zum anderen habe ich auch den Fragesteller ernst genommen, indem ich immer versucht habe, klare Antworten zu geben. Denn letztlich will man ja doch wissen: «Was ist denn eigentlich los?»

Natürlich sind sowohl die Auswahl der Fragen als auch der Zuschnitt der Antworten persönlich geprägt. Und manchmal musste ich auch meinen Mut zusammennehmen, um die Antwort so klar, prägnant und pointiert stehen zu lassen. Ich habe mich dabei an dem wunderbaren Satz orientiert, den Theodor Fontane seinen Stechlin sagen lässt: «Unanfechtbare Wahrheiten gibt es überhaupt nicht, und wenn es welche gibt, so sind sie langweilig.»

Ich hoffe, mit diesem Buch alle Fragen beantwortet zu haben. Aber wenn Sie noch eine Frage haben und glauben, dass ich Ihnen helfen kann, dann schreiben Sie mir doch einfach: albrecht.beutelspacher@mathematikum.de.

Grundlagen

1

Was ist Mathematik?

Die schwierigste Frage zu Beginn!
Deshalb gebe ich gleich vier Antworten.

1. Man kann Mathematik dadurch definieren, dass man sie inhaltlich beschreibt, also die *Objekte* benennt, die in der Mathematik untersucht werden.

Traditionell unterscheidet man Geometrie, Algebra, Analysis und Stochastik. Geometrie ist die Lehre des uns umgebenden Raums, den wir dadurch zu erfassen versuchen, dass wir Punkte, Geraden, Ebenen, Dreiecke, Vierecke, Kreise und so weiter definieren und durch deren Studium ein immer besseres Verständnis des Raums erhalten. Wie die Geometrie hatte auch die Algebra ihre erste Blütezeit in der griechischen Antike. Man studiert unter diesem Begriff Zahlen und deren Eigenschaften, zum Beispiel Primzahlen. Die Analysis, auch Differential- und Integralrechnung genannt, ist die Lehre von Größen, die sich kontinuierlich verändern. Sie wurde wesentlich geprägt von Leibniz und Newton. Die Stochastik ist die jüngste der vier Disziplinen; sie ist die mathematische Lehre vom Zufall.

2. Man kann Mathematik auch dadurch definieren, dass man ihre *Methode* beschreibt, die sie aus der Menge aller anderen Wissenschaften heraushebt.



Was die Mathematik wirklich auszeichnet, ist der Beweis, also die rein logische Ableitung ihrer Aussagen.

Mathematik behandelt Begriffe, die klar definiert sind: Dreiecke, Vierecke, Kreise, ganze Zahlen, Primzahlen, Funktionen und so weiter. Sie behandelt Eigenschaften dieser Begriffe und Beziehungen dieser Eigenschaften: In jedem rechtwinkligen Dreieck gilt der Satz des Pythagoras.

Durch diese logischen Beziehungen wird Ordnung in die Welt der Begriffe gebracht.

3. Man kann auch den Blick nach außen wenden und das Augenmerk auf die *Beschreibung und Beherrschung der Welt* durch die Mathematik richten.

Galileo Galilei (1564–1642) war der Überzeugung, dass Mathematik die Sprache der Natur ist.

Mathematik ist das mächtigste Instrument, mit dem wir die Welt um uns herum beschreiben, erkennen und strukturieren können.

4. Eine moderne und, wie ich finde, sehr treffende Beschreibung stammt von dem Mathematiker Hans Freudenthal (1905–1990), der gleichermaßen als Fachwissenschaftler und als Didaktiker Herausragendes geleistet hat. Er sagt: «Mathematische Begriffe, Konzepte und Verfahren sind Werkzeuge, mit denen wir Phänomene der physikalischen, der sozialen und der mentalen Welt gedanklich organisieren.»

In dieser Definition kommt deutlich zum Ausdruck, dass Mathematik *von Menschen gemacht* wird: «Wir ... organisieren.» Mathematik entsteht nicht von alleine, sondern durch aktives Handeln von Menschen.

Übrigens: Dieses Buch gibt noch 100 weitere Antworten auf die Frage, was Mathematik ist.

2

Seit wann gibt es Mathematik?

Mathematik ist – zusammen mit der Astronomie – die älteste Wissenschaft. Trotzdem gibt es mindestens drei Antworten auf die Frage, seit wann es Mathematik gibt.

Erste Antwort: seit etwa 30 000 Jahren. Aus dieser Zeit stammen die ersten Kulturzeugnisse der Menschheit, darunter auch Knochen, die viele Kerben enthalten. Diese sind so sorgfältig, so gleichmäßig und so systematisch ausgeführt, dass die Historiker sicher sind: Dabei handelt es sich um Zahlendarstellungen. Was damit gezählt wurde und warum, wissen wir nicht. Aber klar ist: Schon damals gab es Menschen, die gezählt haben und für die das Ergebnis so wichtig war, dass sie es mühsam in Knochen eingekerbt haben.

Die zweite Antwort lautet: Mathematik gibt es seit etwa 5000 Jahren. Damals benutzten sowohl die Babylonier als auch die Ägypter hoch entwickelte mathematische Methoden. Sie konnten Zahlen sinnvoll notieren, gewisse Gleichungen lösen, Kalenderberechnungen durchführen und Land vermessen. Dazu benutzten sie Erkenntnisse wie den Satz des Pythagoras, die wir heute, ohne zu zögern, der Mathematik zuordnen. Soweit wir das beurteilen können, wurden diese Erkenntnisse wie Naturgesetze angenommen. Das heißt, sie wurden an Beispielen überprüft und dann einfach verwendet.

Daher ist eine dritte Antwort notwendig. Diese lautet: Vor etwa 2500 Jahren haben die Griechen die Mathematik in unserem Sinne erfunden. Denn ihnen ist damals bewusst geworden, dass man durch genaues Nachdenken, scharfes Argumentieren sowie folgerichtiges Schließen zu Erkennt-



nissen gelangen kann und nicht nur durch Augenschein, Erfahrung und Intuition.

Damals wurden drei Begriffe geprägt: Definition, Satz, Beweis. Dieser Dreiklang ist heute etwas in Misskredit geraten – verständlicherweise, denn er wurde jahrzehntelang als didaktisches Allheilmittel benutzt, wofür er nie gedacht war.

In einer *Definition* wird ein Begriff präzise beschrieben und unmissverständlich von anderen abgegrenzt. In der Mathematik wissen wir immer ganz genau, worüber wir reden. Wenn wir «Kreis» sagen, dann meinen wir damit nicht irgendetwas Rundes, dem bei Bedarf irgendwelche Eigenschaften zugesprochen werden, sondern ein Kreis ist definiert als die Menge aller Punkte, die vom Mittelpunkt den gleichen Abstand haben. Und man darf nur diese Eigenschaft benutzen.

Die Erkenntnisse der Mathematik werden in *Sätzen* dargestellt. Hier gilt Ähnliches wie bei den Definitionen: Wir wissen auch immer genau, was wir beweisen müssen oder was wir bewiesen haben.

Der *Beweis* ist die Methode der Mathematik zur Wahrheitssicherung. Das ist das «scharfe Nachdenken» in geordneter Form. Ein Beweis basiert auf rein logischen Schlussfolgerungen, ist also so objektiv wie möglich.

Ich weiß, dass viele Schülerinnen und Schüler sowie manche Studierende Beweise nicht mögen, und ich weiß auch, dass im Schulunterricht immer weniger Beweise vorkommen. Das finde ich nicht nur persönlich schade, sondern es ist ein Fehler. Denn genau dadurch zeichnet sich die Mathematik vor allen anderen Wissenschaften aus, dass man in ihr die Ergebnisse durch reine Logik und deshalb mit einem Höchstmaß an Objektivität erhält.

Denken Sie mal an den Satz des Pythagoras, den berühmtesten mathematischen Satz: In jedem rechtwinkligen Dreieck, dessen kurze Seiten die Längen a und b haben und des-

sen lange Seite die Länge c hat, gilt $a^2+b^2=c^2$. Dieser Satz wurde vor 2500 Jahren zum ersten Mal bewiesen, er gilt heute noch wörtlich so wie damals – und er wird auch in 2500 Jahren noch genauso gelten wie heute und damals! Welche Wissenschaft kann das von sich behaupten?

3

Welches ist das erste Mathematikbuch?

Etwa 300 Jahre vor Christus schrieb ein Mann ein Buch, das zu den Werken mit den größten Auswirkungen auf die Geschichte gehört. Es hat zwar keine politischen, gesellschaftlichen oder religiösen Umwälzungen hervorgebracht wie etwa die *Bibel*, der *Koran* oder *Das Kapital*, aber es hat einen kaum vorstellbaren Einfluss auf die Entwicklung der Wissenschaft genommen: Die Geschichte der Mathematik wäre ohne dieses Buch völlig anders verlaufen. Es ist das mit Abstand wichtigste – und übrigens auch erfolgreichste – Mathematikbuch aller Zeiten.

Der Mann hieß Euklid, und das Buch, das er schrieb, heißt *Die Elemente*.

Über den Menschen Euklid wissen wir fast nichts. Er wirkte vermutlich zwischen 320 und 260 v. Chr. in Alexandria, dem damaligen Wissenschaftszentrum der Welt, und gilt als Begründer der mathematischen Schule von Alexandria. Er hat zahlreiche Bücher verfasst, darunter sechs mathematische.

Euklids berühmtestes Werk sind zweifellos *Die Elemente*, ein Werk, das in 13 Bücher eingeteilt ist. Die Bücher I bis IV behandeln die Geometrie der Ebene, Buch V die Proportionenlehre, Buch VI stellt die Ähnlichkeitsgeometrie dar, die Bücher VII bis IX Zahlentheorie, Buch X studiert inkommensurable Strecken, die Bücher XI bis XIII behandeln schließlich räumliche Geometrie.



Wenn man das Buch aufschlägt, ist man verblüfft von dessen Nüchternheit. Es beginnt nicht mit einer programmatischen Vorrede, nicht mit einem Verweis auf die Vorgänger, nicht mit Danksagungen, sondern es geht direkt los. Definitionen, Axiome, Postulate, nur wenige Seiten und dann Sätze, Aufgaben und Konstruktionen.

Vermutlich gibt es kaum Sätze in den *Elementen*, die Euklid als Erster bewiesen hat. Das war nicht sein Ziel. Das Ziel der *Elemente* war es, das damalige mathematische Wissen systematisch zusammenzufassen. Schon eine bloße Zusammenfassung wäre eine bewundernswerte Leistung gewesen, die Euklid Unsterblichkeit gesichert hätte.

Aber das Buch ist kein Lexikon, auch keine Datenbank, in der alles gleichwertig nebeneinandersteht. Die Leistung Euklids besteht darin, alles in Form gebracht zu haben, in die mathematische Form. Und dies bedeutet, dass eines aus dem anderen folgt, ja folgen muss. Der Aufbau ist folgerichtig so, dass alle Aussagen bewiesen werden und zum Beweis nur logische Schlüsse zugelassen sind, in denen Aussagen benutzt werden, die schon bewiesen sind! Das heißt: Für die Aussage Nummer 29 darf man nur die Sätze 1 bis 28 verwenden. Das kann man natürlich nicht ad infinitum machen, sondern man muss auf irgendwelche Aussagen aufbauen: Dies sind die Grundsätze oder Postulate, zu denen wir heute Axiome sagen. Ein typisches Postulat lautet: Durch je zwei Punkte kann man eine gerade Linie ziehen. Also lautet die Regel: Zum Beweis des Satzes Nummer 29 darf man nur die Sätze 1 bis 28 und die Postulate verwenden.

Die Elemente sind ein stilbildendes Werk, das mustergültig den Aufbau einer Wissenschaft zeigt, ein Werk, das Orientierung gibt und Maßstäbe setzt!

Euklid hat einen De-facto-Standard geschaffen, der nun 2300 Jahre lang die Mathematik geprägt, ja definiert hat und dies tun wird, solange es Mathematik geben wird.

4

Was ist ein Punkt?

Der erste Satz des ersten Mathematikbuchs der Welt, der *Elemente* des Euklid, lautet: «Definitionen. 1. Ein *Punkt* ist, was keine Teile hat.»

Natürlich beginnt Euklid mit Definitionen. Damit man genau weiß, worüber man spricht. Dann kommen die Postulate und Axiome, zum Beispiel «Gefordert soll sein, dass man von jedem Punkt nach jedem Punkt die Strecke ziehen kann», und anschließend folgen Sätze, die meist als herausfordernde Aufgabe gestellt sind. Der erste lautet: «Über einer gegebenen Strecke ein gleichseitiges Dreieck errichten.»

All diese Sätze werden bewiesen. Das heißt, sie werden mit logischen Schlussregeln aus den Postulaten und Axiomen sowie den schon bewiesenen Sätzen gefolgert. Das ist perfekt und vorbildlich. So wie Mathematik sein soll.

Es bleibt nur ein kleiner Makel. Die erste Definition, die Definition eines Punktes, die so klar zu sein scheint, wird nie verwendet. Auch die zweite Definition: «Eine *Linie* ist eine breitenlose Länge», wird nie benutzt. Nie gibt es ein Argument, das sagt: «Aus der Definition eines Punktes, nämlich dass er keine Teile hat, folgt das und das.» Hat Euklid das vergessen?

Die Mathematik hat über 2000 Jahre gebraucht, um dieses Problem zu lösen. Immer wieder hat man versucht zu beschreiben, was denn ein Punkt wirklich *ist*. Dabei stellte sich allgemeines Unbehagen ein, nicht weil das zu schwierig oder gar unmöglich war, sondern weil man diese Definitionen allesamt nicht verwenden konnte. Das scheint negativ zu sein, aber es ist absolut positiv. Man *braucht* keine solche Definition. Man muss nicht wissen, was ein Punkt «ist», um Geometrie machen zu können. Das klingt paradox, aber es ist eine befreiende Erkenntnis.



Der Erste, der diese Erkenntnis klar aussprach, war der Gießener Mathematiker Moritz Pasch im 19. Jahrhundert. Das Problem, was denn ein Punkt sei, wurde nicht gelöst, sondern es hat sich aufgelöst. Es reicht, die Postulate und Axiome zu kennen. Das ist so ähnlich wie beim Schachspiel. Man muss nicht wissen, was ein Turm «ist», sondern muss nur die Regeln kennen, nach denen er zieht, schlägt und geschlagen wird.

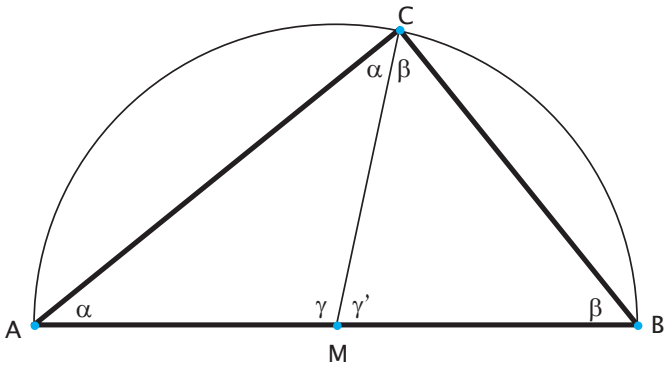
Unübertrefflich drastisch hat dies David Hilbert zum Ausdruck gebracht, der bedeutendste Mathematiker der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Er sagt radikal: «Man muss jederzeit anstelle von «Punkten», «Geraden» und «Ebenen» «Tische», «Stühle» und «Bierseidel» sagen können.»

5

Was ist ein Beweis?

«Seit der Zeit der Griechen bedeutet «Mathematik» zu sagen, «Beweis» zu sagen», schreibt Nicolas Bourbaki, und er muss es wissen. Denn hinter dem Pseudonym «Nicolas Bourbaki» verbirgt sich ein weitgehend französisches Autorenkollektiv höchster mathematischer Qualität, das seit 1934 der Mathematik neue, «strenge» Grundlagen gab. Insbesondere war der Anspruch von Bourbaki, dass alles bewiesen werden muss.

Eine Aussage wird bewiesen, indem sie aus schon bewiesenen Aussagen durch rein logische Argumente abgeleitet wird. Wenn wir zum Beispiel den Satz des Thales («Der Winkel im Halbkreis ist ein rechter») beweisen, dann dürfen wir den Basiswinkelsatz («In einem gleichschenkligen Dreieck sind die Basiswinkel gleich groß») und den Winkelsummensatz («In jedem Dreieck ist die Summe der Innenwinkel gleich 180° ») benutzen, denn diese wurden schon vorher bewiesen.



Der Beweis funktioniert grob so: Aufgrund des Basiswinkelsatzes sind die beiden mit α beziehungsweise β bezeichneten Winkel gleich groß. Nun nützt man die Winkelsumme in den beiden Dreiecken rechts und links aus sowie die Tatsache, dass die Winkel γ und γ' zusammen 180° ergeben. Daraus ergibt sich $\alpha + \beta = 90^\circ$.

Entscheidend ist, dass dieser Beweis nur dann Gültigkeit hat, wenn zuvor der Basiswinkelsatz, der Winkelsummensatz und der Satz über die Nebenwinkel ($\ll \gamma + \gamma' = 180^\circ \gg$) bewiesen worden sind.

Um diese Sätze zu beweisen, darf man wiederum nur Sätze benutzen, die schon vorher bewiesen wurden. Und so weiter. Aber irgendwann ist dieser Rückgriff auf bereits bewiesene Sätze natürlich ausgeschöpft. Irgendwo muss jeder Beweis schließlich verankert werden. Das bedeutet: Man führt alles auf Sätze zurück, die nicht bewiesen werden. Weil sie nicht mehr bewiesen werden können. Diese Sätze nennt man Axiome. Ein Axiom ist zum Beispiel der Satz: «Je zwei verschiedene Punkte liegen auf genau einer Geraden.»

Zusammenfassend gesagt: Zum Beweis eines Satzes darf man zum einen schon bewiesene Sätze verwenden und zum anderen die Axiome – und nur diese!

Übrigens: Ein Beweis ist weit entfernt von einer rein

logischen Spielerei. In der Regel liegt ihm eine höchst kreative Leistung zugrunde. Das kann man im Kleinen schon bei obigem Beweis des Satzes von Thales sehen. Der entscheidende Zug bestand darin, die Punkte C und M zu verbinden. Wenn das geschehen ist, läuft der Rest fast automatisch.

Jeder, der sich mit Mathematik beschäftigt, weiß, dass Beweise oft schwer nachzuvollziehen sind. Aber noch viel schwieriger ist es, einen Beweis zu finden. Das ist so wie in der Musik: Eine Beethovensonate zu spielen ist eine große Leistung – aber unvorstellbar viel größer ist die Leistung, die Sonate zu komponieren!

6

Was sind Axiome?

Axiome sind die Grundaussagen, aus denen sich, ausschließlich mit Hilfe logischer Schlüsse, alle gültigen Aussagen einer Theorie ergeben. Diese «axiomatische Methode» wurde bereits im ersten Mathematikbuch der Welt, den *Elementen* von Euklid, kompromisslos angewandt.

Euklid unterscheidet zwischen «Axiomen», die für ihn logische Regeln sind, und «Postulaten», die sich auf die Geometrie beziehen. Wir würden heute beides Axiome nennen.

Über viele Jahrhunderte hinweg war man jedoch der Meinung, dass Axiome nicht nur Grundlagen einer Theorie sind, sondern dass sie sich noch durch etwas anderes auszeichnen, nämlich durch ihre unmittelbar einleuchtende Wahrheit. Aristoteles hat auch hier eine enorme Wirkung gehabt. Bei ihm bedeutet *axiōma* einen Satz, der eines Beweises nicht bedürftig ist.

Durch die Verknüpfung beider Aspekte wurde logische Folgerichtigkeit an Wahrheit gekoppelt: Da die Axiome wahr sind, müssen auch die aus den Axiomen logisch abgeleiteten Sätze wahr – und nicht nur «richtig» – sein.

Man hätte schon etwas misstrauisch werden können, denn die Axiome sind keineswegs eindeutig festgelegt. Eine Theorie hat in der Regel viele Axiomensysteme. Manche Axiome kann man gleichwertig durch andere Aussagen ersetzen. Das euklidische Parallelenpostulat ist zum Beispiel gleichwertig mit dem Satz «Die Winkelsumme im Dreieck beträgt 180° » oder mit dem Satz «Durch drei Punkte, die nicht auf einer Geraden liegen, geht ein Kreis».

Den Knoten durchschnitten hat mit der ihm eigenen Radikalität der Mathematiker David Hilbert (1862–1943). Er hat die «ontologische Bindung» gekappt und klargemacht, dass Axiome nur das logische Fundament einer Theorie sind. Die Frage der Wahrheit stellt sich nach Hilbert überhaupt nicht. Denn um Mathematik zu machen, brauchen wir nicht zu wissen, was die Begriffe, die in den Axiomen vorkommen (Punkte, Geraden usw.), «sind». Wir müssen nicht wissen, was ein Punkt oder eine Gerade «ist», wir müssen nur wissen, wie man mit ihnen operiert. Diese Spielregeln werden durch die Axiome beschrieben. Die Frage nach der Wahrheit der Axiome stellt sich grundsätzlich nicht.

Man kann eine Theorie aus den Axiomen entwickeln, ohne eine etwaige Bedeutung der Begriffe oder eine eventuelle Wahrheit der Axiome postulieren zu müssen. Kommt es dann zur Anwendung gewisser Ergebnisse der Theorie, muss überprüft werden, was die Grundbegriffe in der realen Situation bedeuten und inwiefern die Axiome innerhalb dieses Kontextes wahre Aussagen sind.

Übrigens ist unter dem Eindruck dieser Diskussion auch Bertrand Russells Spitze zu verstehen, die nicht nur als abschätziges Bonmot gelesen werden sollte: «So kann also die Mathematik definiert werden als diejenige Wissenschaft, in der wir niemals das kennen, worüber wir sprechen, und niemals wissen, ob das, was wir sagen, wahr ist.»