

Max Tegmark

# Unser mathematisches Universum

Auf der Suche nach dem  
Wesen der Wirklichkeit

Aus dem Amerikanischen  
von Hubert Mania

Ullstein

# Inhalt

|   |    |
|---|----|
| VORWORT . . . . .                                       | 15 |
| 1 WAS IST WIRKLICHKEIT? . . . . .                       | 17 |
| Nicht das, was es zu sein scheint . . . . .             | 17 |
| Wie lautet die wichtigste Frage? . . . . .              | 23 |
| Die Reise beginnt . . . . .                             | 27 |
| ERSTER TEIL   |    |
| HINAUSGEZOOMT . . . . .                                 | 35 |
| 2 UNSERE STELLUNG IM RAUM . . . . .                     | 37 |
| Kosmische Fragen . . . . .                              | 37 |
| Wie groß ist der Weltraum? . . . . .                    | 39 |
| Die Größe der Erde . . . . .                            | 42 |
| Entfernung zum Mond . . . . .                           | 44 |
| Entfernung zur Sonne und zu den Planeten . . . . .      | 45 |
| Entfernung zu den Sternen . . . . .                     | 47 |
| Entfernung zu den Galaxien . . . . .                    | 52 |
| Was ist Raum? . . . . .                                 | 55 |
| 3 UNSERE STELLUNG IN DER ZEIT . . . . .                 | 61 |
| Woher stammt unser Sonnensystem? . . . . .              | 62 |
| Woher stammen die Galaxien? . . . . .                   | 71 |
| <i>Galaxienbildung</i> . . . . .                        | 71 |
| <i>Unser Universum könnte expandieren</i> . . . . .     | 73 |
| <i>Unser Universum expandiert tatsächlich</i> . . . . . | 77 |
| <i>Das expandierende Universum begreifen</i> . . . . .  | 79 |
| <i>Wohin expandiert unser Universum?</i> . . . . .      | 81 |
| <i>Der kosmische Hörsaal</i> . . . . .                  | 82 |

|   |   |     |
|---|---|-----|
|   | Woher stammen die rätselhaften Mikrowellen? . . . . .       | 84  |
|   | <i>Der kosmische Plasmaschirm</i> . . . . .                 | 85  |
|   | <i>Die aufgespürte Nachglut</i> . . . . .                   | 87  |
|   | <i>Babyfotos unseres Universums</i> . . . . .               | 88  |
|   | <i>Der Golddrausch</i> . . . . .                            | 90  |
|   | <i>Der kosmische Wasserball</i> . . . . .                   | 96  |
|   | <i>Die Achse des Bösen</i> . . . . .                        | 97  |
|   | <i>Die kosmische Hintergrundstrahlung wird erwachsen</i> .  | 99  |
|   | Woher stammen die Atome? . . . . .                          | 101 |
|   | <i>Der kosmische Fusionsreaktor</i> . . . . .               | 101 |
|   | <i>Urknall in Gefahr</i> . . . . .                          | 103 |
|   | <i>Was genau ist eigentlich ein Urknall?</i> . . . . .      | 105 |
| 4 | UNSER UNIVERSUM IN ZAHLEN . . . . .                         | 111 |
|   | Gesucht: Präzisionskosmologie . . . . .                     | 112 |
|   | Präzise Mikrowellenhintergrundfluktuationen . . . . .       | 116 |
|   | <i>Teleskope und Computer</i> . . . . .                     | 117 |
|   | <i>Gold in den Hügeln</i> . . . . .                         | 120 |
|   | <i>Dunkle Energie</i> . . . . .                             | 122 |
|   | <i>Eine Trefferquote von 50 Prozent</i> . . . . .           | 124 |
|   | <i>Die Beule ist zurück</i> . . . . .                       | 126 |
|   | Präzise Clusterbildung von Galaxien . . . . .               | 127 |
|   | <i>Rotverschiebungskataloge von Galaxien</i> . . . . .      | 128 |
|   | <i>Von verspotteter Kosmologie zur Präzisionskosmologie</i> | 132 |
|   | Die endgültige Karte unseres Universums . . . . .           | 138 |
|   | <i>Was zu erforschen bleibt</i> . . . . .                   | 138 |
|   | <i>Wasserstoffvermessung</i> . . . . .                      | 141 |
|   | <i>Was ist eigentlich ein Teleskop?</i> . . . . .           | 142 |
|   | <i>Das Omniskop</i> . . . . .                               | 144 |
|   | Woher stammt unser Urknall? . . . . .                       | 147 |
| 5 | UNSER KOSMISCHER URSPRUNG . . . . .                         | 151 |
|   | Was ist mit unserem Urknall los? . . . . .                  | 152 |
|   | <i>Das Horizontproblem</i> . . . . .                        | 154 |
|   | <i>Das Flachheitsproblem</i> . . . . .                      | 156 |

|  |     |
|--|-----|
| Wie die Inflation funktioniert . . . . .   | 158 |
| <i>Die Kraft der Verdoppelung</i> . . . . .  | 158 |
| <i>Gelöste Probleme</i> . . . . .  | 161 |
| <i>Wer hat das ultimative kostenlose Mittagessen bezahlt?</i> . . . . .                      | 163 |
| Das Geschenk, das sich ständig selbst erneuert . . . . .                                     | 166 |
| <i>Inflationszugabe</i> . . . . .  | 166 |
| <i>Die Dichteschwankungen im frühen Universum</i> . . . . .                                  | 167 |
| Ewige Inflation . . . . .  | 172 |
| <i>Nicht aufzuhalten</i> . . . . .   | 173 |
| <i>Wie man einen unendlichen Raum<br/>    in einem endlichen Volumen erschafft</i> . . . . . | 176 |
| <br>   |     |
| 6 WILLKOMMEN IM MULTIVERSUM . . . . .  | 185 |
| Das Ebene-I-Multiversum . . . . .  | 185 |
| <i>Was ist ein Universum?</i> . . . . .  | 186 |
| <i>Wie sehen Ebene-I-Paralleluniversen aus?</i> . . . . .                                    | 189 |
| <i>Sind Paralleluniversen unwissenschaftlich?</i> . . . . .                                  | 191 |
| <i>Beweise für Ebene-I-Paralleluniversen</i> . . . . .                                       | 194 |
| <i>Wo sind die Ebene-I-Paralleluniversen?</i> . . . . .                                      | 200 |
| Das Ebene-II-Multiversum . . . . .   | 203 |
| <i>Viele Universen in einem Raum</i> . . . . .   | 204 |
| <i>Vielfalt!</i> . . . . .   | 206 |
| <i>Feinabstimmung als Nachweis für das<br/>        Ebene-II-Multiversum</i> . . . . .        | 213 |
| <i>Feinabgestimmte dunkle Energie</i> . . . . .  | 214 |
| <i>Feinabgestimmte Teilchen</i> . . . . .  | 216 |
| <i>Feinabgestimmte Kosmologie</i> . . . . .  | 217 |
| <i>Die Glücksfall-Erklärung</i> . . . . .  | 218 |
| <i>Das A-Wort</i> . . . . .  | 219 |
| <i>Mit welchen Vorhersagen können wir rechnen?</i> . . . . .                                 | 222 |
| <i>Nicht alles ist verloren</i> . . . . .  | 225 |
| Halbzeitzusammenfassung<br>zum Thema Multiversum . . . . .                                   | 228 |

## ZWEITER TEIL

|   |     |
|---|-----|
| HINEINGEZOOMT . . . . .                                       | 235 |
| 7 KOSMISCHE LEGOSTEINE . . . . .                              | 237 |
| Atomare Legosteine . . . . .                                  | 238 |
| Nukleare Legosteine . . . . .                                 | 240 |
| Das Lego der Teilchenphysik . . . . .                         | 243 |
| Mathematische Legosteine . . . . .                            | 246 |
| Photonenlegosteine . . . . .                                  | 250 |
| Über dem Gesetz? . . . . .                                    | 252 |
| Quanten und Regenbögen . . . . .                              | 255 |
| Wellen schlagen . . . . .                                     | 257 |
| Quantenmerkwürdigkeit . . . . .                               | 262 |
| Der Zusammenbruch des Konsens. . . . .                        | 264 |
| Das Verrückte lässt sich nicht einschränken . . . . .         | 268 |
| Quantenkonfusion . . . . .                                    | 270 |
| 8 DAS EBENE-III-MULTIVERSUM . . . . .                         | 273 |
| Das Ebene-III-Multiversum . . . . .                           | 275 |
| Die Illusion der Zufälligkeit . . . . .                       | 283 |
| Quantenzensur . . . . .                                       | 290 |
| Die Freuden des Ausgestochenen . . . . .                      | 297 |
| Warum Ihr Gehirn kein Quantencomputer ist . . . . .           | 301 |
| Subjekt, Objekt und Umgebung . . . . .                        | 306 |
| Quantenselbstmord . . . . .                                   | 312 |
| Quantenunsterblichkeit . . . . .                              | 318 |
| Vereinigte Multiversen . . . . .                              | 322 |
| Wechselnde Ansichten: Viele Welten oder Viele Worte . . . . . | 329 |

## DRITTER TEIL

|  |            |
|--|------------|
| ABSTAND GEWINNEN . . . . .   | 337        |
| <b>9 INNERE WIRKLICHKEIT, ÄUSSERE WIRKLICHKEIT<br/>UND KONSENSWIRKLICHKEIT . . . . .</b> | <b>339</b> |
| Äußere Wirklichkeit und innere Wirklichkeit . . . . .                                    | 341        |
| Die Wahrheit, die ganze Wahrheit<br>und nichts als die Wahrheit . . . . .                | 343        |
| Konsenswirklichkeit . . . . .  | 345        |
| Physik: Die äußere Wirklichkeit<br>mit der Konsenswirklichkeit verbinden . . . . .       | 349        |
| <b>10 MATERIELLE WIRKLICHKEIT UND<br/>MATHEMATISCHE WIRKLICHKEIT . . . . .</b>           | <b>355</b> |
| Mathe, überall Mathe! . . . . .  | 359        |
| <i>Formen, Muster und Gleichungen</i> . . . . .  | 361        |
| <i>Zahlen</i> . . . . .  | 363        |
| <i>Mehr Hinweise</i> . . . . .   | 368        |
| Die Hypothese des Mathematischen Universums . . . . .                                    | 370        |
| <i>Ballast abwerfen</i> . . . . .  | 371        |
| <i>Mathematische Strukturen</i> . . . . .  | 377        |
| Was ist eine mathematische Struktur? . . . . .   | 378        |
| <i>Ballast und gleichwertige Beschreibungen</i> . . . . .                                | 379        |
| <i>Ballast und mathematische Strukturen</i> . . . . .                                    | 382        |
| <i>Symmetrie und andere mathematische Eigenschaften</i> . . . . .                        | 384        |
| <b>11 IST ZEIT EINE ILLUSION?. . . . .</b>   | <b>395</b> |
| Wie kann die materielle Wirklichkeit<br>mathematisch sein? . . . . .                     | 396        |
| <i>Zeitlose Wirklichkeit</i> . . . . .   | 396        |
| <i>Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft</i> . . . . .                                    | 398        |
| <i>Wie Raumzeit und »Stoff« mathematisch sein können</i> . . . . .                       | 401        |
| <i>Beschreibung kontra Äquivalenz</i> . . . . .  | 405        |
| Was sind Sie? . . . . .  | 407        |
| <i>Der Zopf des Lebens</i> . . . . .   | 408        |
| <i>Im Augenblick leben</i> . . . . .   | 412        |

|  |   |     |
|--|---|-----|
|  | <i>Bewusstseinsfähigkeit</i> . . . . .  | 418 |
|  | <i>Die Vorhersage Ihrer Zukunft</i> . . . . .   | 420 |
| Wo sind Sie (und was nehmen Sie wahr)? . . . . . |   | 421 |
|  | <i>Die Vorhersage Ihrer Zukunft – erneut aufgegriffen.</i> . . . . .  | 422 |
|  | <i>Bewusstseinsfähigkeit finden</i> . . . . .   | 423 |
|  | <i>Berechnung der inneren Wirklichkeit:</i>   |     |
|  | <i>Was hat uns die Geschichte gelehrt?</i> . . . . .  | 427 |
| Wann sind Sie? . . . . .                         |   | 432 |
|  | <i>Jenseits des zweifachen Ansatzes von Popper</i> . . . . .  | 433 |
|  | <i>Warum sind Sie keine Ameise?</i> . . . . .   | 435 |
|  | <i>Warum Sind Sie kein Boltzmann-Gehirn?</i> . . . . .  | 440 |
|  | <i>Das Weltuntergangsargument.</i> . . . . .  | 444 |
|  | <i>Warum ist die Erde so alt?</i> . . . . .   | 446 |
|  | <i>Warum sind wir nicht jünger?</i> . . . . .   | 448 |
|  | <i>Das Maßproblem: Die Physik in der Krise</i> . . . . .  | 450 |
|  | <i>Unendliche Probleme</i> . . . . .  | 455 |
| 12   | <b>DAS EBENE-IV-MULTIVERSUM</b> . . . . .   | 461 |
|  | <b>Warum ich an das Multiversum der Ebene IV glaube</b> . . . . .   | 461 |
|  | <i>Warum diese Gleichungen und keine anderen?</i> . . . . .   | 461 |
|  | <i>Mathematische Demokratie</i> . . . . .   | 462 |
|  | <i>Wie die Hypothese vom Mathematischen Universum</i><br><i>(HMU) auf das Ebene-IV-Multiversum hinausläuft.</i> . . . . . | 464 |
|  | <b>Die Erkundung des Ebene-IV-Multiversums:</b>   |     |
|  | <b>Was gibt's da draußen?</b> . . . . .   | 467 |
|  | <i>Unsere unmittelbare Nachbarschaft</i> . . . . .  | 467 |
|  | <i>Unsere Postleitzahl im Ebene-IV-Multiversum</i> . . . . .  | 469 |
|  | <i>Die Struktur des Ebene-IV-Multiversums</i> . . . . .   | 473 |
|  | <i>Grenzen des Ebene-IV-Multiversums: Unentscheidbar,</i><br><i>unberechenbar und undefiniert</i> . . . . .               | 475 |
|  | <i>Die Hypothese des Berechenbaren Universums</i> . . . . .   | 479 |
|  | <i>Die transzendente Struktur von Ebene IV</i> . . . . .  | 483 |
|  | <b>Auswirkungen des Ebene-IV-Multiversums</b> . . . . .   | 485 |
|  | <i>Symmetrien und darüber hinaus</i> . . . . .  | 485 |
|  | <i>Die Illusion von Anfangsbedingungen</i> . . . . .  | 488 |
|  | <i>Die Täuschung der Zufälligkeit</i> . . . . .   | 489 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Die Täuschung der Komplexität</i> . . . . .   | 490 |
| <i>Anfangsbedingungen neu interpretiert</i> . . . . .  | 495 |
| <i>Zufälligkeit neu interpretiert</i> . . . . .  | 496 |
| <i>Wie die Komplexität auf ein Multiversum hinweist</i> . . . . .                              | 497 |
| Leben wir in einer Simulation? . . . . .   | 499 |
| <i>Die falsche Vorstellung von der Zeit</i> . . . . .  | 500 |
| <i>Eine andere Berechnungsart</i> . . . . .  | 502 |
| <i>Muss eine Simulation wirklich ausgeführt werden?</i> . . . . .                              | 503 |
| Die Beziehungen zwischen der HMU, dem<br>Ebene-IV-Multiversum und anderen Hypothesen . . . . . | 504 |
| Die Überprüfung des Ebene-IV-Multiversums . . . . .  | 506 |
| <i>Die Vorhersage von etwas Typischem</i> . . . . .  | 506 |
| <i>Die Vorhersage der mathematischen Gesetzmäßigkeit</i> . . . . .                             | 510 |
| <b>13 DAS LEBEN, UNSER UNIVERSUM UND DER GANZE REST</b> . . . . .                              | 515 |
| Wie groß ist unsere materielle Wirklichkeit? . . . . .   | 515 |
| <i>Plädoyer für eine kleinere Wirklichkeit</i> . . . . .                                       | 517 |
| <i>Plädoyer für eine größere Wirklichkeit</i> . . . . .  | 522 |
| Die Zukunft der Physik . . . . .   | 525 |
| Die Zukunft unseres Universums –   |     |
| Wie wird es enden? . . . . .   | 527 |
| Die Zukunft des Lebens . . . . .   | 533 |
| <i>Existentielle Risiken</i> . . . . .   | 534 |
| <i>Unsere sterbende Sonne</i> . . . . .  | 536 |
| <i>Asteroiden, Supernovae und Supervulkane</i> . . . . .                                       | 538 |
| <i>Selbstverschuldete Probleme</i> . . . . .   | 541 |
| <i>Versehentlicher Atomkrieg</i> . . . . .   | 542 |
| <i>Eine feindselige Singularität</i> . . . . .   | 545 |
| <i>Menschliche Dummheit: Aus kosmischer Perspektive</i> . . . . .                              | 554 |
| <i>Menschliche Gesellschaft: Aus wissenschaftlicher<br/>        Perspektive</i> . . . . .      | 556 |
| Ihre eigene Zukunft – Sind Sie unbedeutend? . . . . .  | 563 |
| <i>Der Sinn des Lebens</i> . . . . .   | 563 |
| <i>Warum sollten wir uns um unser eigenes<br/>        Universum kümmern?</i> . . . . .         | 565 |
| <i>Sind wir unbedeutend?</i> . . . . .   | 566 |



|   |     |
|---|-----|
| <i>Sind wir allein?</i> . . . . .               | 567 |
| <i>Sind wir wirklich unbedeutend?</i> . . . . . | 571 |
| DANK . . . . .                                  | 574 |
| ANMERKUNGEN . . . . .                           | 575 |
| LITERATUREMPFEHLUNGEN . . . . .                 | 590 |
| REGISTER . . . . .                              | 598 |