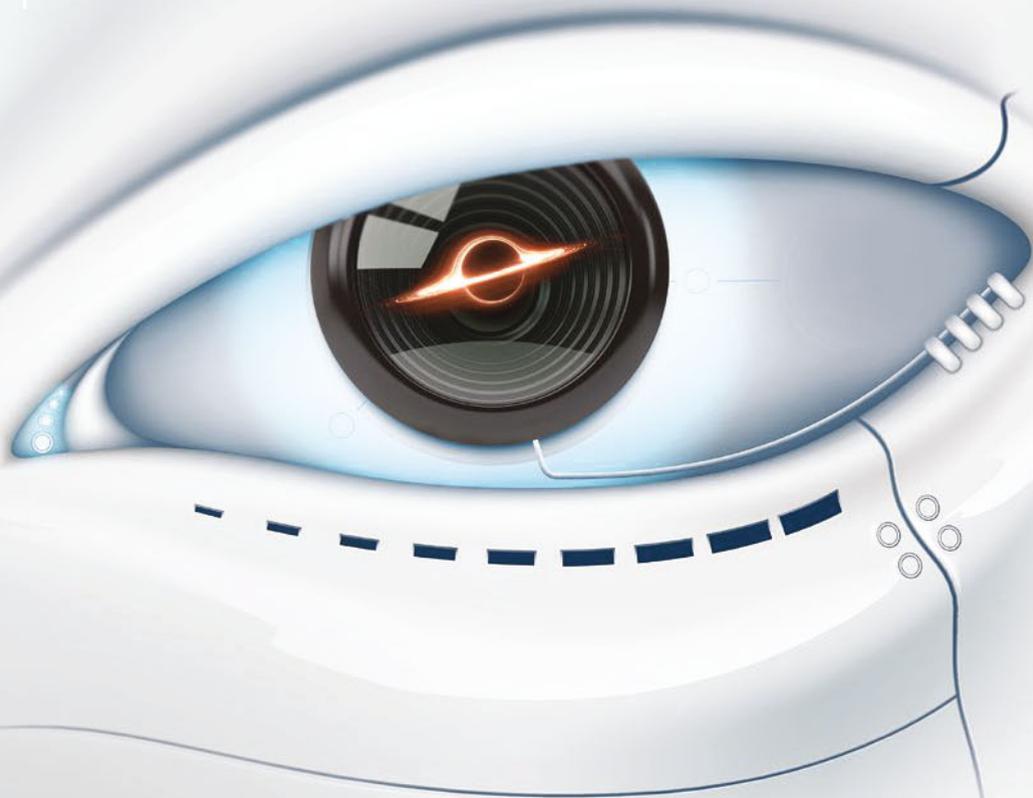


Isaac oder Die Entdeckung der Raumzeit

Martin Bäker



EBOOK INSIDE

 Springer

Isaac oder Die Entdeckung der Raumzeit

Martin Bäker

Isaac oder Die Entdeckung der Raumzeit

 Springer

Martin Bäker
Braunschweig, Deutschland

ISBN 978-3-662-57292-4 ISBN 978-3-662-57293-1 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-57293-1>

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

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019

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

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

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

Verantwortlich im Verlag: Lisa Edelhäuser

Einbandabbildung: deblik Berlin unter Verwendung einer Grafik von NASA und © Trifonenko Ivan/stock.adobe.com

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature

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

Danksagung

Ohne die Leserinnen und Leser meines Blogs „Hier wohnen Drachen“ wäre dieses Buch nie geschrieben worden. Die vielen positiven Rückmeldungen zu meinen Texten, gerade auch zur Relativitätstheorie, haben mich ermutigt, mich tiefer in die Materie einzuarbeiten und das, was ich gelernt habe, weiterzugeben.

Ganz besonders danke ich den fleißigen Kommentatorinnen und Kommentatoren, die mir mit ihren Fragen deutlich gemacht haben, welche Punkte besonders schwer zu verstehen sind, und die mir in Diskussionen mit klugen Kommentaren und teilweise enzyklopädischem Wissen viel beigebracht haben. Stellvertretend für viele andere bedanke ich mich bei Alderamin, Bjoern Feuerbacher, Bullet, Herrn Senf, MisterX, Niels und Physik-Fan.

Weiterhin möchte ich allen danken, die mir im Internet (auf Blogs, Foren oder per E-Mail) Fragen beantwortet oder Hinweise gegeben haben, darunter Andrew Hamilton, Matthew Francis, Sabine Hossenfelder, Edwin F Taylor und den Mitgliedern der Internet-Seite physicsforum, insbesondere Peter Donis und Orodruin, die gerade bei formalen Fragen zur ART immer die richtige Formel parat hatten. Ein herzlicher Dank geht auch an Markus Pössel, der mir mehrfach mit hilfreichen Antworten und Quellen auf die Sprünge geholfen hat.

Ich danke auch meinen Testlesern Gabriela Lippert und Stephan Seider, die mich mit positiver Rückmeldung unterstützt haben. Nicht genug danken kann ich Dieter Kreuzer und Roland Elpert; beide haben das gesamte Manuskript mit großer Sorgfalt durchgearbeitet, zahlreiche Schwachstellen

VI Danksagung

und Fehler gefunden und dafür gesorgt, dass es deutlich lesbarer wurde. Für nach wie vor verbliebene Fehler tragen sie natürlich keine Verantwortung.

Sehr gefreut habe ich mich über die gute Zusammenarbeit mit dem Springer-Verlag. Lisa Edelhäuser stand immer für Fragen zur Verfügung, hat mich mit zahlreichen Anregungen unterstützt und dafür gesorgt, dass aus einer Idee ein Buchprojekt werden konnte. Bettina Saglio stand mir bei technischen Fragen hilfreich zur Seite.

Und schließlich geht ein ganz besonderer Dank an meine Frau Annette und meine Tochter Elisabeth, die mich beim Schreiben des Buchs trotz der vielen Stunden, die ich am Computer verschwunden war, immer bestärkt und unterstützt und mir mit zahlreichen Ratschlägen zur Seite gestanden haben.

Braunschweig
im April 2018

Martin Bäker

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------------------------|---|----|
| 1 | Einführung | 1 |
| | Begegnung | 2 |
| | | |
| Teil I Konzepte | | |
| 2 | Raum und Trägheit | 7 |
| | Raum und Zeit | 13 |
| | Philosophische Fallstricke? | 13 |
| | Nahewirkungsprinzip | 15 |
| | Drei Welten | 17 |
| | Was kennzeichnet ein Objekt? | 20 |
| | Bewegung in der Newton'schen Raumzeit | 21 |
| | Die Geschwindigkeit | 23 |
| | Koordinatensysteme | 24 |
| | Vektoren | 25 |
| | Koordinatentransformationen | 26 |
| | Invarianten | 27 |
| | Inertialsysteme | 28 |
| | | |
| 3 | Gekrümmte Räume | 31 |
| | Der gekrümmte Raum | 36 |
| | Die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten ist (k)eine | |
| | Gerade | 37 |
| | Parallelen | 40 |

VIII Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Winkelsumme | 41 |
| Rechtecke | 42 |
| Überschussradius | 43 |
| Paralleltransport | 44 |
| Lokal ist der Raum flach | 46 |
| Einbettungen sind unnötig | 47 |
| 4 Beschleunigungen und Kräfte | 51 |
| Beschleunigung | 55 |
| Kräfte | 56 |
| Die Impulserhaltung | 59 |
| 5 Energie | 63 |
| Energie und Arbeit | 69 |
| Energieerhaltung | 71 |
| Erweiterungen des Energiebegriffs | 72 |
| Das Noether-Theorem | 76 |
| 6 Geodäten | 79 |
| Beschleunigungen und Kräfte | 86 |
| Gekrümmte Räume | 88 |
| Mehr über Koordinatensysteme | 88 |
| Karten und Koordinaten | 91 |
| Die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten | 92 |
| Die Metrik | 96 |
| Koordinatenbeschleunigungen | 98 |
| Geschwindigkeit und Koordinatenbeschleunigung | 100 |
| Abweichung benachbarter Geodäten | 102 |
| Nicht-geodätische Bewegung | 103 |
| Die Wahl des Koordinatensystems | 104 |
| Fragen | |

Teil II Komplikationen

| | |
|------------------------------------|------------|
| 7 Relativität | 113 |
| Elektromagnetismus | 117 |
| Die spezielle Relativitätstheorie | 119 |
| Die Lichtgeschwindigkeit in Medien | 120 |

| | |
|--|-----|
| Ist die Spezielle Relativitätstheorie eine Theorie des Elektromagnetismus? | 121 |
| Das Ende der Newton'schen Physik | 122 |
| 8 Lichtgeschwindigkeit | 125 |
| Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit | 132 |
| Zeitdilatation | 132 |
| Längenkontraktion | 136 |
| Gleichzeitigkeit | 138 |
| Kausalität | 140 |
| Überlichtgeschwindigkeit | 141 |
| Scheinbare Überlichtgeschwindigkeit | 142 |
| Geschwindigkeitsaddition | 143 |
| Die Gültigkeit der SRT | 144 |
| 9 Raumzeit | 149 |
| Raumzeit-Diagramme | 159 |
| Vierervektoren | 164 |
| Abstand und Eigenzeit | 166 |
| Seltsame Abstände | 169 |
| Verwirrende Einheiten | 171 |
| Zwillingsparadoxon | 171 |
| 10 Bewegung in der Raumzeit | 175 |
| Das Prinzip der maximalen Eigenzeit | 186 |
| Die Vierergeschwindigkeit | 189 |
| Die „Geometrisierung“ der Physik | 192 |
| Der Viererimpuls | 195 |
| $E = mc^2$ | 195 |
| Masse und Bewegungsenergie | 198 |
| Wie beweist man $E = mc^2$? | 202 |

Illusion

Teil III Konstruktionen

| | |
|------------------------------------|-----|
| 11 Freier Fall | 211 |
| Die Allgemeine Relativitätstheorie | 220 |
| Das Äquivalenzprinzip | 221 |
| „Gerade Wege“ in der Raumzeit | 222 |

X Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| Die Wurfparabel | 223 |
| Die Raumzeit ist gekrümmt | 227 |
| Lokal ist die Raumzeit flach | 230 |
| Weltlinien im freien Fall | 231 |
| Oberflächlich betrachtet | 232 |
| Es gibt keine Schwerkraft | 234 |
| Scheinkraft, Koordinatenbeschleunigung oder Kraft | 235 |
| 12 Die gekrümmte Raumzeit | 237 |
| Die Krümmung des Raums | 241 |
| Überschussradius | 243 |
| Das leidige Gummituch | 245 |
| Raumartige Geodäten | 246 |
| Beschleunigung langsamer Objekte | 247 |
| Lichtablenkung | 249 |
| Geodäten im Raum | 250 |
| Das Bestiarium der Krümmungsmaße | 252 |
| Die Raumzeit ist torsionsfrei | 253 |
| Die Metrik | 253 |
| Der Riemann'sche Krümmungstensor | 255 |
| Benachbarte Geodäten | 257 |
| Der Ricci-Tensor | 258 |
| Der Einstein-Tensor | 261 |
| Der Weyl-Tensor | 262 |
| 13 Energie, Impuls und Strom | 265 |
| Was ist die Quelle der Raumzeit-Krümmung? | 270 |
| Die Dichte | 271 |
| Masse oder Energie? | 272 |
| Die Energie in unterschiedlichen Bezugssystemen | 273 |
| Ströme | 274 |
| Der Energie-Impuls-Tensor | 275 |
| Impulsstrom und Spannung | 276 |
| Gravitomagnetismus | 280 |
| Energie-Impuls-Tensor und Erhaltungssätze | 281 |
| 14 Die Einstein-Gleichung | 283 |
| Die Einstein-Gleichung | 288 |
| Erhaltungssätze und Einstein-Gleichung | 290 |
| Wie stark krümmt Materie die Raumzeit? | 291 |
| Ist Gleiches wirklich gleich? | 293 |

| | |
|---|-----|
| Was bedeutet die Einstein-Gleichung? | 294 |
| Die Einstein-Gleichung ist dynamisch | 295 |
| Materie in der gekrümmten Raumzeit | 296 |
| Die Energie des Gravitationsfelds | 298 |
| Ist die Gravitation selbst eine Quelle der Gravitation? | 299 |
| Raumzeit und Abstraktion | 301 |

Lenkung

Teil IV Konsequenzen

| | |
|---|-----|
| 15 Sterne und Planeten | 315 |
| Symmetrische Lösungen | 321 |
| Koordinaten | 322 |
| Die Schwarzschild-Metrik | 324 |
| Die innere Metrik | 326 |
| Die Masse in der Schwarzschild-Raumzeit | 329 |
| Planetenbahnen | 330 |
| Die Periheldrehung des Merkur | 331 |
| Lichtablenkung | 334 |
| Gezeitenkräfte | 336 |
| 16 Schwarze Löcher | 339 |
| Der Weg zum Schwarzen Loch | 345 |
| Schwarze Löcher sind unausweichlich | 346 |
| Der Ereignishorizont | 348 |
| Sturz ins Innere des Schwarzen Lochs | 351 |
| Experimente am Ereignishorizont | 352 |
| Stürzender Raum | 354 |
| Bahnen um Schwarze Löcher | 355 |
| Rotation | 357 |
| 17 Gravitationswellen | 363 |
| Wie Gravitationswellen den Raum verzerren | 369 |
| Beschleunigungen durch eine Gravitationswelle | 373 |
| Erzeugung von Gravitationswellen | 375 |
| Messung von Gravitationswellen | 377 |
| Wechselwirkung von Gravitationswellen | 379 |

Erkenntnis

Teil V Konflikte

| | | |
|-----------|---|-----|
| 18 | Wurmlöcher und Zeitreisen | 389 |
| | Wurmlöcher | 394 |
| | Exotische Materie | 396 |
| | Ist exotische Materie möglich? | 397 |
| | Wurmloch-Typen | 399 |
| | Erzeugung von Wurmlöchern | 400 |
| | Zeitmaschinen | 401 |
| | Überlichtschnelles Reisen | 404 |
| 19 | Die Ausdehnung des Universums | 405 |
| | Das homogene Universum | 412 |
| | Die Einstein-Gleichung im homogenen Universum | 413 |
| | Das Universum dehnt sich aus | 415 |
| | Skalenfaktor und Hubble-Parameter | 417 |
| | Die Rotverschiebung | 420 |
| | Hintergrundstrahlung | 422 |
| | Die Krümmung des Universums | 423 |
| | Die Evolution des Universums | 425 |
| | Die kosmologische Konstante | 428 |
| | Probleme des Urknalls | 431 |
| | Expansion und Materie | 432 |
| 20 | Schwerkraft oder Raumzeit-Krümmung? | 435 |
| | Die Schwerkraft | 438 |
| | Wie wirkt die Gravitation? | 439 |
| | Träge und schwere Masse | 441 |
| | Feld und potentielle Energie | 441 |
| | Das Äquivalenzprinzip | 443 |
| | Können Kräfte die Raumzeit krümmen? | 444 |
| | Kraft oder Raumzeit-Krümmung? | 446 |
| 21 | Quanten und Gravitation | 447 |
| | Der Weg zur Quantenmechanik | 457 |
| | Quantenmechanische Zustände | 458 |
| | Die Wellenfunktion | 460 |

| | |
|-------------------------------|-----|
| Messproblem und Kollaps | 461 |
| Unterschiedliche Zustände | 462 |
| Unschärfe | 464 |
| Quantenfelder | 466 |
| Das Vakuum | 467 |
| Teilchen | 468 |
| Wechselwirkung von Teilchen | 470 |
| Hawking-Strahlung | 471 |
| Quantisierung der Gravitation | 474 |
| Gravitonen | 475 |
| Mögliche Lösungen | 477 |
| Fazit | 480 |
| Rebellion | |
| Anhang A: Notation | 491 |
| Anhang B: Anmerkungen | 493 |
| Glossar | 535 |
| Literatur | 541 |
| Personenverzeichnis | 547 |
| Sachverzeichnis | 549 |



1

Einführung

Die Oberfläche eines Planeten ist ein schlechter Ort, um das Universum zu verstehen.

Wir alle – auch diejenigen, die Physik in der Schule gehasst haben – lernen als Kinder eine ganze Menge über die Naturgesetze. Wir lernen, dass Objekte sich nicht durchdringen können, dass Objekte hinter oder in anderen Objekten verschwinden können, aber trotzdem noch da sind, und dass Dinge ihre Masse nicht ändern, wenn man sie verformt. Wir lernen auch, dass Objekte herunterfallen, wenn man sie loslässt (und dass das ziemlich wehtun kann); wir lernen, dass Bälle, die wir rollen, zwar eine Weile weiterrollen, aber immer langsamer werden und schließlich stehen bleiben. Wenn wir Fahrrad fahren, müssen wir in die Pedale treten, auch wenn wir mit konstanter Geschwindigkeit fahren, wir lernen also, dass Objekte zur Ruhe kommen, wenn man sie nicht antreibt. Wir merken, dass es uns anstrengt, ein Gewicht auf konstanter Höhe zu halten, und wundern uns im Physikunterricht, wenn uns erzählt wird, dass wir dabei keinerlei Arbeit leisten.

All das spielt sich nach unserem Verständnis auf einer Bühne ab, die wir „Raum“ nennen und auf der die Zeit überall in gleicher Weise vergeht. Raum und Zeit sind uns dabei so selbstverständlich, dass wir uns eine Welt ohne Raum und Zeit nicht vorstellen können.

Einige der Regeln, die wir so lernen, gelten auch in weiten Teilen des Universums, nicht nur auf der Oberfläche unseres kleinen Planeten irgendwo in einem Spiralarm der Milchstraße, viele allerdings auch nicht. Die moderne Physik untersucht das Verhalten von Objekten wie Neutronensternen, subatomaren Teilchen oder dem expandierenden Universum – alle diese Dinge sind weit weg von unserer Alltagserfahrung, und die Regeln, die wir im

Alltag gelernt haben, gelten für sie nicht. Und selbst das, was wir hier auf der Erde beobachten – beispielsweise, dass Objekte nach unten fallen, weil die Schwerkraft auf sie wirkt – erscheint im Licht der modernen Physik oft ganz anders.

Um das Universum zu verstehen, müssen wir viele der Konzepte, die wir als Kinder mühsam herausgeknobelt haben, wieder „verlernen“.

Gerade zum besseren Verständnis von Raum und Zeit wäre es vielleicht einfacher, wir würden unsere ersten Erfahrungen mit der Welt und der Physik nicht auf der Oberfläche eines Planeten machen, sondern irgendwo weit draußen im Weltall, möglichst weit entfernt von jeder Schwerkraft, unbeeinflusst von Dingen wie Reibung oder Luftwiderstand...

Begegnung

Ein quaderförmiger Raum, ähnlich einem Flugzeughangar, mit metallischen Wänden, hell erleuchtet durch Lichtstreifen an zwei gegenüberliegenden Wänden. An einer Stirnseite des Raums sind verschiedene Messgeräte an der Wand verankert, deren Bereitschaftsanzeigen blinken, daneben ein großer Bildschirm. Vor dem Bildschirm sitzt eine Person in einem Sessel. Sie beobachtet einen schwerelos schwebenden humanoiden Roboter, der soeben beginnt, sich zu bewegen.

ISAAC: Inductive Spacetime Analysation and Abstraction Computer funktionsbereit.

SAN: Guten Tag, Isaac. Ich bin Dr. Sandhya Bhattacharyya. Du kannst mich San nennen.

ISAAC: Guten Tag, San. Was ist meine Funktion?

SAN: Deine Aufgabe ist es, die Natur von Raum und Zeit zu erkunden. Dafür wurdest du geschaffen.

ISAAC: Ich verstehe. Was ist Ihre Aufgabe?

SAN: Ich werde dich bei deinen Forschungen unterstützen. Du wirst mir die Ergebnisse deiner Überlegungen präsentieren, und ich kann dir helfen, sie zu interpretieren. Wenn du neue Phänomene entdeckst, kann ich dir passende Begriffe nennen, die wir zu ihrer Beschreibung verwenden können.

ISAAC: Wo befinden wir uns? Ich sehe einen quaderförmigen Raum mit einer Ausdehnung von $12,8 \times 51,2 \times 115,2$ Metern. Was ist dies für ein Ort?

SAN: Dies hier ist das Labor.

Du findest hier Objekte und Messgeräte, mit denen du deine Untersuchungen anstellen kannst. Du bist so programmiert, dass du die Funktionsweise all dieser Geräte verstehst. Du selbst verfügst über lasergesteuerte Entfernungsmesser und eine hochpräzise Atomuhr, so dass du Entfernungen

und Zeitabstände präzise erfassen kannst. Alle diese Dinge stehen dir zur Verfügung, um deine Aufgabe zu erfüllen.

ISAAC: Das ist sehr interessant.

Allerdings bin ich mir nicht sicher, dass ich den Kern meiner Aufgabe korrekt verstehe. Die Tatsache, dass ich die Begriffe „Raum“ und „Zeit“ einordnen kann und weiß, was Sie damit meinen, bedeutet, dass Sie mir bereits ein Verständnis dieser Begriffe mitgegeben haben.

Mir ist klar, dass der „Raum“ begrifflich dazu dient, die Tatsache darzustellen, dass sich Gegenstände an unterschiedlichen Orten befinden können und dass es möglich ist, Entfernungen zwischen ihnen zu messen. Genau das habe ich ja bereits eben getan, als ich die Abmessungen des Labors bestimmt habe.

Für den Begriff „Zeit“ gilt etwas Ähnliches: Ich verstehe, dass Sie diesen Begriff dazu verwenden, um deutlich zu machen, dass man Ereignisse zueinander anordnen kann: Meine Funktionsmeldung am Anfang unseres Gespräches lag zeitlich vor meiner Vermessung des Labors, die wiederum vor dem jetzigen Zeitpunkt liegt.

SAN: Das ist richtig.

ISAAC: Ich verfüge also bereits über ein intuitives Verständnis von Raum und Zeit. Da Sie mir dieses Verständnis mitgegeben haben, sollen meine Untersuchungen offensichtlich darüber hinaus gehen.

Isaac schweigt.

SAN: Worüber denkst du nach?

ISAAC: Ich überlege, welchen Aspekt der Begriffe ich Ihrer Ansicht nach untersuchen soll. Ich habe beobachtet, dass sie einige Sekunden, nachdem ich zu reden aufhörte, unruhig zu werden begannen. Sie haben sich auf Ihrem Stuhl stärker bewegt als Sie es vorher während unseres Gespräches taten und haben schließlich eine Frage gestellt. Das lässt mich schließen, dass Sie eine Zeitspanne, in der sich nichts ereignet, als störend wahrnehmen.

SAN: Ich verstehe. Warum hältst du das für relevant?

ISAAC: Ein Aspekt von Raum und Zeit ist ohne Zweifel ihre Wahrnehmung durch bewusste Wesen wie Sie und mich. Anders als Sie empfinde ich allerdings eine längere ereignislose Zeitspanne nicht negativ.

Ein mögliches Ziel meiner Untersuchungen könnte es also sein, zu verstehen, wie zwei unterschiedliche Bewusstsein diese Phänomene wahrnehmen.

Allerdings vermute ich, dass dies nicht das ist, was Sie als meine Aufgabe ansehen.

SAN: Wie kommst du darauf?

ISAAC: Sie haben mir, wie Sie sagten, unterschiedliche Geräte zur Verfügung gestellt. Beispielsweise sehe ich dort an der Wand Laser und verschiedene Sensoren. Diese eignen sich dazu, Experimente mit materiellen Objekten durchzuführen; sie erscheinen mir allerdings wenig geeignet, um unsere unterschiedliche subjektive Wahrnehmung zu untersuchen.

Darauf deutet auch hin, dass Sie mich anscheinend mit einem starken Drang ausgestattet haben, Dinge zu messen – nahezu meine erste bewusste Handlung im Labor bestand darin, seine Abmessungen zu bestimmen.

Ich vermute deshalb, dass Sie meine Aufgabe so interpretieren, dass ich versuchen soll, durch Experimente herauszufinden, wie sich Objekte in Raum und Zeit verhalten, um so Informationen über Raum und Zeit zu gewinnen, die gerade nicht subjektiv sind.

SAN: Das ist richtig.

Teil I

Konzepte



2

Raum und Trägheit

ISAAC: Sie haben gesagt, meine Aufgabe sei es, die Natur von Raum und Zeit zu untersuchen. Ich empfinde das als eine seltsame Fragestellung.

SAN: Warum das?

ISAAC: Sie implizieren damit, dass es einen Zusammenhang zwischen Raum und Zeit gibt. Sollte man nicht den Raum und die Zeit getrennt untersuchen?

SAN: Das kannst du zunächst gern tun, Isaac. Wir werden sehen, wohin es dich führt.

ISAAC: Gut, ich denke, ich werde mit dem Raum beginnen. Allerdings kann ich den Raum selbst nicht beobachten. Alles, was ich kann, ist zu beobachten, wie sich Objekte im Raum verhalten.

Isaac nimmt eine Stahlkugel aus einem Regal und lässt sie neben sich schweben.

Wenn ich eine Kugel wie diese hier bewegen möchte, dann muss ich auf sie einwirken, beispielsweise, indem ich sie berühre. Es ist nicht möglich, die Kugel zu bewegen, ohne mit ihr in Kontakt zu treten, direkt, indem ich sie berühre oder auch indirekt, indem ich, so wie jetzt, eine andere Kugel gegen sie werfe. Das habe ich letztlich auch schon dadurch feststellen können, dass ich mich zum Regal bewegen musste, um die Kugel herauszunehmen.

Es scheint allerdings auch Phänomene zu geben, für die das nicht gilt. Beispielsweise erreicht das Licht der Lampen meine Augen – aber dazu muss es den Raum durchqueren. Wenn ich mir die Hand vor die Augen halte, kann ich die Lampen nicht mehr erkennen.

Isaac nimmt einen Funksender aus einem Regal, schaltet ihn ein und bewegt ihn durch den Raum.

Die Funkwellen, die dieser Sender aussendet, erreichen mich auch dann, wenn ich eine Hand vor meine integrierte Antenne halte; allerdings werden

sie abgeschwächt. Vielleicht sollte ich versuchen, den Sender stärker abzuschirmen.

Isaac platziert den Sender in einer Kiste und verschließt diese.

Das Funksignal des Senders ist jetzt sehr schwach geworden.

SAN: Was schließt du aus diesen Experimenten?

ISAAC: Eine Eigenschaft des Raums scheint mir sehr zentral zu sein: Objekte können nur aufeinander einwirken, wenn sie sich in unmittelbarer Nachbarschaft befinden: Ein Objekt, das sich von einem Ort zu einem anderen bewegt, muss den Raum dazwischen durchqueren. Auch das Licht der Lampen erreicht meine Augen, indem es sich durch das Labor bewegt – sonst könnte ich es nicht abschirmen, indem ich etwas zwischen mich und die Lichtquelle halte. Dasselbe gilt auch für Funkwellen.

Bisher habe ich keinen Effekt gefunden, bei dem zwei Objekte aufeinander einwirken, ohne dass sie entweder an einem Ort aufeinandertreffen oder etwas zwischen ihnen ausgetauscht wird.

Dies wird auch dadurch bestätigt, dass ich keine Informationen darüber besitze, was sich außerhalb des Labors oder hinter seinen Wänden befindet: Effekte von dort scheinen mich durch die Wand nicht zu erreichen.

SAN: Und was bedeutet das deiner Ansicht nach für die Eigenschaften des Raums?

ISAAC: Wenn ich mir den Raum als aus Punkten bestehend vorstelle, dann gibt es eine Struktur, die diese Punkte verbindet, sodass einige Punkte unmittelbar benachbart sind, andere nicht. Zwei Punkte sind unmittelbar benachbart, wenn ein Objekt an dem einen Punkt auf ein Objekt an dem anderen Punkt einwirken kann. Jede Wirkung über eine größere Distanz muss durch etwas vermittelt werden, das diese Distanz überbrückt.

SAN: Wir können dies „Nahwirkungsprinzip“ nennen.

ISAAC: Ich verstehe...

Das Nahwirkungsprinzip bedeutet auch, dass es für die weitere Untersuchung des Raums sinnvoll ist, mich auf Experimente zu konzentrieren, die auf einen kleinen Bereich des Raums begrenzt sind.

SAN: Deine Experimente sind also lokal.

ISAAC: Meine Hand befindet sich jetzt an diesem Raumpunkt hier. Wenn ich diese Stahlkugel loslasse, so dass sie neben meiner Hand schwebt, dann bleibt sie dort regungslos. Der Abstand zwischen meiner Hand und der Kugel ändert sich nicht.

Solange also nichts auf ein Objekt einwirkt, bleibt es am selben Ort.

SAN: Was bedeutet das deiner Ansicht nach?

ISAAC: Wenn ein Objekt zu einem Zeitpunkt an einem Ort ist und keine Einwirkung von außen erfährt, dann ist es zu einem späteren Zeitpunkt am selben Ort.

Vielleicht kann ich es auch so ausdrücken: Um ein Objekt zu beschreiben, muss ich seinen Ort kennen, denn es besteht eine Beziehung zwischen dem Teilchen und dem Ort, an dem es sich befindet.

Ich kann mir vorstellen, dass ich das ganze Labor zum Beispiel mit sehr feinem Staub anfülle. Jedes Staubkorn bleibt dann an seinem Ort und markiert einen Punkt des Raumes.

SAN: Interessant. Das bedeutet also, dass jeder Punkt im Raum eindeutig zu identifizieren ist.

ISAAC: Richtig. Ich kann dies mit Hilfe der Staubkörner tun, ich kann aber auch beispielsweise angeben, in welcher Entfernung von den Wänden des Labors sich ein Punkt befindet. Dazu brauche ich drei Zahlen.

SAN: Der Raum ist also dreidimensional, und jeder Raumpunkt ist eindeutig durch drei Zahlen zu kennzeichnen.

ISAAC: So scheint es. Ich möchte diese Überlegung aber noch einmal überprüfen.

Isaac wirft eine Kugel langsam durch das Labor.

Sehen Sie: Wenn ich die Stahlkugel nehme, sie mit der Hand bewege und dann loslasse, dann bleibt sie nicht an ihrem Ort. Sie entfernt sich immer weiter von mir.

Das ist interessant: Die Kugel wird nicht langsamer, sie behält ihre Bewegung genau bei. Nach einer Sekunde hatte sie sich 1,52 Meter von mir entfernt, nach zwei Sekunden 3,04 Meter, und nach ... acht Sekunden sind es 12,16 Meter. Die Kugel entfernt sich von mir mit einer konstanten Rate.

SAN: ... die wir „Geschwindigkeit“ nennen. Die Stahlkugel hat jetzt eine Geschwindigkeit von 1,52 Meter pro Sekunde.

ISAAC: Gut. Es ist also anscheinend so, dass Objekte ihre Geschwindigkeit beibehalten, nicht ihren Ort. Die Kugel hat auch ihre Richtung beibehalten, sie ist auf einer geraden Linie durch das Labor geflogen. Meine ursprüngliche Annahme war also nicht korrekt. Objekte, die nicht beeinflusst werden, bewegen sich anscheinend mit konstanter Geschwindigkeit. In meinen ersten Experimenten war diese Geschwindigkeit gleich null; deshalb blieben die Objekte an ihrem Ort.

SAN: Lass uns diese Eigenschaft von Objekten „Trägheit“ nennen.

ISAAC: Das Trägheitsprinzip sagt also, dass sich ein Objekt auf einer geraden Bahn mit konstanter Geschwindigkeit bewegt.

SAN: Das gilt aber doch nicht immer, oder? Sonst hättest du die Geschwindigkeit der Kugel ja nicht ändern können.

ISAAC: Das ist richtig. Korrekt muss das Trägheitsprinzip also so formuliert werden: Ein Objekt bewegt sich auf einer geraden Bahn mit konstanter Geschwindigkeit, wenn keine äußeren Einflüsse wirken.

SAN: Was bedeutet das für dein Verständnis von Raum und Zeit?

ISAAC: Wenn jedes Objekt an seinem Ort bleiben würde, sobald ich es loslasse, wäre es einfach, Punkte im Raum zu verschiedenen Zeiten zu identifizieren – ein Punkt im Raum wäre dadurch bestimmt, dass ein Objekt an ihm verharret.

Weil das aber nicht so ist, stellt sich für mich die Frage: Woher weiß ich, ob sich tatsächlich die Stahlkugel von mir entfernt oder ob ich es bin, der sich von der Stahlkugel entfernt? Wer von uns beiden ist tatsächlich in Ruhe und am selben Raumpunkt?

Ich sollte untersuchen, was passiert, wenn ich mich selbst durch das Labor bewege. Lässt sich diese Bewegung durch Experimente feststellen?

Isaac stößt sich von der Wand des Labors ab und schwebt durch den Raum.

Während ich durch das Labor schwebe, merke ich keinen Unterschied zu der Situation, als ich im Labor in Ruhe war. Wenn ich eine Stahlkugel loslasse, während ich durch das Labor schwebe, dann bewegt sie sich mit mir zusammen durch das Labor; relativ zu mir ist sie also in Ruhe.

Wie Sie sehen können, kann ich umgekehrt der Kugel eine Geschwindigkeit geben, so dass sie sich von mir entfernt, aber relativ zum Labor in Ruhe ist.

Es ist also gar nicht klar, ob es überhaupt möglich ist, festzustellen, ob ich mich bewege oder ob ich in Ruhe bin.

SAN: Aber du siehst doch, dass du dich durch das Labor oder relativ zu dem Staub, den wir uns im Labor ausgebreitet denken, bewegst.

ISAAC: Natürlich – aber kann es nicht genauso gut sein, dass sich das Labor mitsamt des Staubes bewegt, während ich in Ruhe bin? Das Labor könnte sich selbst bewegen, innerhalb eines größeren Labors, das in Ruhe ist. Ich frage mich: Kann ich absolut feststellen, ob sich etwas bewegt, oder ist Bewegung immer nur relativ?

Vielleicht lässt sich eine Bewegung auf andere Weise bestimmen?

Isaac nimmt zwei Stahlkugeln, verbindet sie mit einer Feder und lässt sie dann schwingen. Er wiederholt das Experiment, während er durch das Labor schwebt.

Zwei Kugeln, die ich mit einer Feder verbinde, können schwingen – aber auch hier ist es so, dass ich dieselbe Zeit pro Schwingung messe, unabhängig davon, ob die Kugeln und ich uns im Labor bewegen oder nicht.

Solange ich nur in meiner unmittelbaren Umgebung messe, scheint es mir nicht möglich zu sein, herauszufinden, ob ich in Ruhe bin oder ob ich mich relativ zum Labor mit konstanter Geschwindigkeit bewege.

SAN: Und was bedeutet das?

ISAAC: Wenn ich den Raum mit Staub anfüllen würde, der sich relativ zu mir nicht bewegt, und Sie den Raum ebenfalls mit einem Staub anfüllen würden, aber ihre Staubkörner bewegen sich relativ zu meinen Staubkörnern, dann gibt es nach meinen bisherigen Messungen kein Experiment, das bestimmen kann, wessen Staubkörner tatsächlich in Ruhe sind. Ich zeige Ihnen auf dem Bildschirm, was ich meine. *Auf dem Bildschirm erscheint* Abb. 2.1.

Es ist also anscheinend nicht möglich, Punkte im Raum zu verschiedenen Zeiten eindeutig miteinander zu identifizieren. Das bedeutet, dass es keinen Sinn ergibt, von „Punkten des Raumes“ zu sprechen, so als würden diese Punkte eine dauerhafte Existenz besitzen. Je nach der Geschwindigkeit zweier Beobachter sind zwei Punkte im Raum zu unterschiedlichen Zeiten identisch oder auch nicht.

Wir können natürlich Raumpunkte zu einem Zeitpunkt ansehen und die Ereignisse an einem Ort zu einer Zeit betrachten – ich lasse jetzt diese Stahlkugel los –, aber ob die Stahlkugel einen Moment später am selben Raumpunkt ist oder nicht, lässt sich nicht eindeutig entscheiden, es ist eine Frage des Standpunkts.

SAN: Wir können diese unterschiedlichen Beschreibungen als „Bezugssysteme“ bezeichnen.

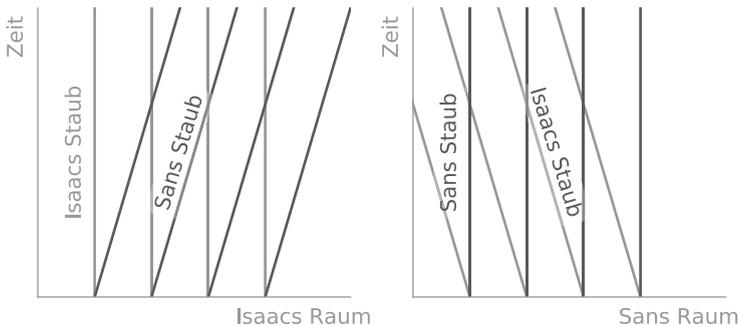


Abb. 2.1 Zwei unterschiedliche Ansichten desselben Raums, dargestellt in einem Raumzeit-Diagramm (auch Weg-Zeit-Diagramm genannt). Ein ruhendes Objekt ist in diesem Diagramm durch eine senkrechte Linie dargestellt, da sich der Ort mit der Zeit nicht ändert; ein Objekt, das sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, wird durch eine geneigte Linie beschrieben, wobei die Linie umso flacher verläuft, je höher die Geschwindigkeit ist. Häufig werden in der klassischen Physik Raumzeit-Diagramme mit der Zeit entlang der horizontalen Achse dargestellt; in der Relativitätstheorie ist es aber üblich, die vertikale Achse für die Zeit zu verwenden, so dass diese Darstellung hier ebenfalls benutzt wurde

Ich finde diese Überlegung allerdings ein wenig beunruhigend. Wenn jeder Beobachter eine andere Vorstellung davon hat, welche Raumpunkte identisch sind, ist dann das Konzept des Raums nicht vollkommen subjektiv?

Nehmen wir zum Beispiel an, du bewegst dich durch das Labor, während ich relativ zum Labor in Ruhe bin. Wenn du dich zu Beginn deiner Bewegung an einem Ende des Labors befindest, zum Ende deiner Bewegung am anderen Ende, dann haben für dich die beiden Ereignisse „Isaac ist an dieser Seite des Labors“ und „Isaac ist an der entgegengesetzten Seite des Labors“ den räumlichen Abstand null. Für mich dagegen entspricht der räumliche Abstand genau der Länge des Labors. Der räumliche Abstand zweier Ereignisse hängt also vom Beobachter ab.

ISAAC: Das ist natürlich richtig. Trotzdem ist das Konzept des Raumes nicht vollkommen subjektiv. Wenn jeder von uns zu einer bestimmten Zeit den Abstand der beiden Laborwände misst, dann werden wir beide denselben Wert von 115,2 Metern erhalten. Der Abstand zweier Punkte zu unterschiedlichen Zeiten ist zwar für unterschiedliche Beobachter verschieden, aber über Dinge wie die Länge von Objekten sind sich unterschiedliche Beobachter immer einig.

SAN: Das ist richtig. Lass uns solche Größen, die für alle Beobachter identisch sind, Invarianten nennen.

ISAAC: Gut. Eine weitere Invariante ist der zeitliche Abstand: Wir beide sind uns darüber einig, dass die beiden Ereignisse denselben zeitlichen Abstand haben – wenn für mich zehn Sekunden zwischen den beiden Ereignissen vergehen, dann vergehen auch für Sie zehn Sekunden.

SAN: Richtig.

ISAAC: Da Invarianten wie der räumliche Abstand zu einer bestimmten Zeit oder der zeitliche Abstand zweier Ereignisse für alle Beobachter identisch sind, ist der Raum kein rein subjektives Konzept – unterschiedliche Beobachter sind sich über bestimmte Größen immer einig.

Um solche Invarianten zu bestimmen, ist es also auf jeden Fall wichtig, Bewegungen zu untersuchen, also zu sehen, wie sich die Position im Raum mit der Zeit ändert. Ich denke, ich verstehe jetzt etwas besser, warum Sie der Ansicht sind, dass Raum und Zeit zusammenhängen.

Ein anderer Aspekt scheint mir ebenfalls wichtig zu sein: Wenn ich ein Objekt beschreiben möchte, dann muss ich nicht nur seinen Ort kennen, sondern auch seine Geschwindigkeit, also die Änderung des Ortes. Wenn ich mir vorstelle, dass sich zwei absolut identische Objekte nacheinander am selben Ort befinden, dann bedeutet das nicht, dass sie beide dasselbe tun, dazu muss auch ihre Geschwindigkeit dieselbe sein. Wenn sie beide denselben Ort mit

derselben Geschwindigkeit passieren, dann werden sie sich auch danach identisch verhalten, zumindest, wenn nichts von außen auf sie einwirkt.

Tatsächlich ist die Geschwindigkeit sogar wichtiger als der Ort – der Ort eines Objekts ändert sich nach dem Trägheitsprinzip, aber seine Geschwindigkeit bleibt unverändert.

SAN: Das sind sehr interessante Überlegungen. Ich denke, du hast heute bereits sehr viel über Raum und Zeit herausgefunden, ich bin gespannt, welche Überlegungen du als Nächstes anstellen wirst.

An der Stirnwand des Labors öffnet sich eine Tür, durch die San, im Sessel sitzend, hinausschwebt.

Raum und Zeit

Existiert der Raum „wirklich“? Gibt es einen „Raum an sich“ – also einen Raum, der absolut leer ist? Ist der Raum eine Vorstellung unseres Geistes, die wir der Außenwelt überstülpen? Vergeht die Zeit wirklich oder ist das nur eine Illusion? Was kennzeichnet diesen Moment „jetzt“, zu dem ich diesen Satz schreibe? Oder ist „dieser Moment“, der, in dem Sie diesen Satz lesen? Wie so oft gilt: je selbstverständlicher ein Konzept ist, desto schwieriger ist es in Begriffe zu fassen.

Der Raum selbst lässt sich nicht beobachten – beobachten können wir nur Objekte innerhalb des Raums. Das Vergehen der Zeit können wir zwar spüren, aber es ist nicht klar, was wir wirklich dabei tun, und wir alle wissen, dass unsere innere Uhr nicht gleichförmig verläuft (während wir das für die Zeit selbst annehmen, sonst könnten wir uns nicht darüber einigen, wie wir unsere Uhren stellen sollen).

Wie also sollen wir etwas über Raum und Zeit herausfinden? Was können wir tun, um diese Konzepte besser zu verstehen?

Da wir Raum und Zeit selbst nicht beobachten können, untersuchen wir, wie sich Objekte in Raum und Zeit verhalten.

Philosophische Fallstricke?

Mit dieser Vorgehensweise sind wir natürlich bereits in eine erkenntnistheoretische Falle getappt: Die Beobachtungen, die wir machen, machen wir selbst in Raum und Zeit – wenn diese Konzepte nicht wirklich existieren, dann sagen auch die besten physikalischen Experimente nichts über sie aus. Immanuel Kant sah Raum und Zeit als Denknöwendigkeiten an, als

Konzepte, ohne die wir nicht denken können.¹ Wir können uns auch vorstellen, wir würden in einer Computersimulation eines dreidimensionalen Raums leben, die vielleicht von Wesen ersonnen wurde, die selbst in vier oder fünf Dimensionen existieren. Oder wir könnten Charaktere sein, die von einer Autorin ersonnen wurden – die Reihenfolge, in der wir Ereignisse erleben, muss dann nichts mit der Reihenfolge zu tun haben, in der die Kapitel geschrieben wurden, und Monate, die für uns vergehen, fasst die Autorin möglicherweise in einem Satz zusammen, für den sie nur Sekunden benötigt hat.

Letztlich können wir nie sicher sein, dass unsere Erkenntnisse über die Welt tatsächlich die Realität wiedergeben. Wir machen uns darüber aber normalerweise keine Gedanken, wenn wir morgens aufstehen, mit anderen Menschen reden oder an unserem Computer arbeiten. Wir können uns also die pragmatische Frage stellen: „Was kann ich über Raum und Zeit mit derselben Sicherheit herausfinden, mit der ich weiß, dass ich heute Morgen zum Frühstück Tee getrunken habe oder dass ich jetzt vor der Computertastatur sitze?“

Wenn wir diese pragmatische Vorgehensweise akzeptieren, dann sind Raum und Zeit unseren Untersuchungen prinzipiell zugänglich. Auch dann haben wir immer noch mit der Schwierigkeit zu tun, die bereits in der Einführung erwähnt wurde: Unsere Konzepte von Raum und Zeit bilden wir in frühester Kindheit, und es ist nicht klar (und tatsächlich auch nicht korrekt), dass Raum und Zeit sich so verhalten, wie es unserer Alltagserfahrung entspricht.

Noch ein zweites Problem sollte nicht vergessen werden: Wir untersuchen hier Raum und Zeit mit den Mitteln der Naturwissenschaft und konzentrieren uns auf objektive Aspekte. Für uns als nicht nur denkende, sondern auch empfindende Wesen ist unser subjektives Verständnis von Raum und Zeit, also unsere direkte Wahrnehmung, natürlich mindestens genauso wichtig. Die Gefühle von Großartigkeit, die uns beim Anblick eines Alpenpanoramas, des Doms von Florenz oder eines Sternenhimmels überkommen, sind zwar nicht objektivierbar, für den einzelnen aber trotzdem genauso real.

Um diese Aspekte von Raum und Zeit zu vermitteln, ist allerdings die Naturwissenschaft nicht die richtige Methode. Trotzdem kann auch das naturwissenschaftliche Verständnis von Raum und Zeit uns Gefühle von Erhabenheit vermitteln: In der Allgemeinen Relativitätstheorie verbinden sich Raum und Zeit zu einer sich dynamisch krümmende Raumzeit, in der sich die Materie bewegt, die ihrerseits die Krümmung der Raumzeit verursacht. Auch diese Vorstellung hat etwas Großartiges. Dass auch Wissenschaft ähnliche Gefühle

¹Dass wir durch die moderne Physik nicht mehr dasselbe Konzept von Raum und Zeit haben wie Kant, bedeutet nicht unbedingt, dass Kant durch die Relativitätstheorie widerlegt ist. Diese Frage wurde bereits kurz nach Veröffentlichung der ART von Philosophen wie Cassirer, Reichenbacher und Schlick intensiv diskutiert; siehe z. B. Engler (2007).

vermitteln kann wie die Kunst, hat der Physiker Richard Feynman so ausgedrückt (Feynman et al. 2011):

Poets say science takes away from the beauty of the stars – mere globs of gas atoms. I too can see the stars on a desert night, and feel them. But do I see less or more? The vastness of the heavens stretches my imagination – stuck on this carousel my little eye can catch one-million-year-old light. A vast pattern – of which I am a part... What is the pattern, or the meaning, or the why? It does not do harm to the mystery to know a little about it. For far more marvelous is the truth than any artists of the past imagined it. Why do the poets of the present not speak of it? What men are poets who can speak of Jupiter if he were a man, but if he is an immense spinning sphere of methane and ammonia must be silent?

[Dichter sagen, dass die Wissenschaft etwas von der Poesie der Sterne fortnimmt – bloße Klumpen von Gasatomen. Auch ich kann die Sterne in einer Wüstennacht sehen und fühlen. Aber sehe ich weniger oder mehr? Die Weite des Himmels erweitert meine Vorstellungskraft – auf diesem Karussell sitzend kann mein kleines Auge eine Million Jahre altes Licht einfangen. Ein riesiges Muster, von dem ich ein Teil bin... Was ist das Muster oder seine Bedeutung oder das Warum? Es schadet dem Geheimnis nicht, ein wenig darüber zu wissen. Denn die Wahrheit ist viel wunderbarer als frühere Künstler sich vorgestellt haben. Warum reden unsere heutigen Dichter nicht davon? Was für Menschen sind Dichter, wenn sie über Jupiter reden können, wenn er ein Mann wäre, aber wenn er eine gigantische sich drehende Kugel aus Methan und Ammoniak ist, müssen sie schweigen? (Eigene Übersetzung)]

Nahewirkungsprinzip

Stelle ich ein Glas auf einen Tisch, dann sehe ich unmittelbar, ob Glas und Tisch einander räumlich nahe sind: Unfallfrei läuft der Vorgang nur ab, wenn ich das Glas direkt auf dem Tisch platziere; lasse ich es einen Meter über dem Tisch fallen, dann prallt es unsanft auf, steht der Tisch im Nebenzimmer, dann gibt es keine Wechselwirkung zwischen Glas und Tisch mehr. Unsere Alltagserfahrung zeigt, dass Objekte miteinander wechselwirken, wenn sie einander räumlich nahe sind. Auch wenn wir Objekte bewegen, spielt die räumliche Nähe eine Rolle. Um das Glas auf den Tisch zu stellen, muss ich es von seiner aktuellen Position in meiner Hand bis zum Tisch hin bewegen; erst dann kann ich es abstellen.

Natürlich gibt es auch Fernwirkungen zwischen Objekten: Eine Stimme ruft mich aus dem Nebenzimmer, das Licht der 150 Millionen Kilometer entfernten Sonne scheint in meine Augen. Diese Fernwirkungen sind aber nur scheinbar, denn die Signale durchqueren den dazwischenliegenden Raum.

Nur deshalb kann ich die Tür oder das Fenster schließen und so die Stimme oder das Sonnenlicht von mir fernhalten.

In unserem Universum gilt demnach das „Nahewirkungsprinzip“: Wechselwirkungen gibt es nur zwischen Objekten, die unmittelbar zueinander benachbart sind, nicht über größere Entfernungen.² In den Worten von Hermann Weyl (2009): „Das ist das Nahewirkungsprinzip; jede Fernwirkung muß durch eine kontinuierliche Wirkungsübertragung vermittelt sein“.

Stellen wir uns eine Welt vor, in der dies anders wäre: Auf irgendeine magische Weise sind wir in dieser Welt in der Lage, Objekte oder auch uns selbst direkt von einem Ort zu einem anderen zu transportieren (zu „teleportieren“) ohne den Raum dazwischen zu durchqueren.³ Ich kann das Glas direkt auf den Tisch stellen, ohne erst zum Tisch zu gehen; ich kann mich selbst ohne Zeitverlust an einen anderen Ort versetzen, wie im Roman „Jonathan Livingston Seagull“ von Richard Bach (2014), wo es heißt „Perfect speed, my son, is being there.“ („Die vollkommene Geschwindigkeit, mein Sohn, ist, dort zu sein.“) In einer solchen Welt würde der Begriff „räumliche Nähe“ viel von seiner Bedeutung verlieren; er wäre aber immer noch relevant, denn das Glas wird nur dann vom Tisch gehalten, wenn es direkt darauf steht.

Noch extremer wäre eine Welt, in der Objekte auch über beliebige Entfernungen miteinander wechselwirken können – ich könnte ein Glas bei mir zu Hause abstellen, weil ein Tisch in Australien es am Herunterfallen hindert. Eine solche Welt ist nur schwer vorstellbar (in welchem Sinn steht ein Tisch „in Australien“, wenn er direkte Auswirkungen auf das Glas in meinem Zimmer hat?), lässt sich aber tatsächlich in gewisser Weise realisieren. Ein Beispiel hierfür ist „Tierra“, ein Programm, das die Evolution von Organismen im Computer simuliert. Das Tierra-Universum besteht aus einem (simulierten) Computerspeicher, in dem Programme „leben“ und ausgeführt werden. Diese Programme können auf andere Bereiche des Speichers zugreifen. Dabei sind alle Bereiche des Speichers „gleich weit“ voneinander entfernt; es ist für ein Programm egal, auf welchen Bereich des Speichers es zugreift. Tierra-Programme können beispielsweise ähnlich wie Viren den Code anderer Programme nutzen – ein Programm kann dies nicht dadurch vermeiden, dass es sich vom Virus-Programm entfernt, weil es innerhalb des Speichers keinen sinnvollen Begriff der Entfernung gibt.⁴

²Eine mögliche Ausnahme sind Effekte der Quantenmechanik, siehe Kap. 21.

³Das in der Science-Fiction häufig verwendete „Beamen“ fällt nicht in diese Kategorie, denn es kann abgeschirmt werden; ein Signal durchquert also immer noch den Raum zwischen Start- und Zielpunkt.

⁴Tatsächlich sind die räumlichen und topologischen Beziehungen innerhalb des Tierra-Universums etwas komplizierter, siehe Ray (1994).

In einer solchen Welt, in der es keinen sinnvollen Entfernungsbegriff gibt, gibt es auch keinen Begriff von „Raum“. In der Welt, in der wir Objekte teleportieren können, gilt das Nahewirkungsprinzip zumindest für einige Wechselwirkungen, so dass der Raumbegriff schon sinnvoller ist, in unserer Welt gilt das Nahewirkungsprinzip für alle Phänomene (möglicherweise mit Ausnahme von Quanteneffekten), und das Konzept „Raum“ ist für uns aus der Welt nicht wegzudenken.

Man kann gegen diese Überlegung einwenden, dass sie den Fokus sehr stark auf die Wechselwirkung zwischen Objekten legt. Wäre es nicht auch in einer statischen Welt mit Objekten, die nicht miteinander wechselwirken, möglich, die Entfernungen zwischen Objekten zu messen? Prinzipiell ist das durchaus richtig: Auf einem Esstisch lässt sich beispielsweise eindeutig sagen, dass der Teller zwischen Messer und Gabel liegt, auf der Erde (deren Kontinente sich ja extrem langsam bewegen) können wir die Entfernung zwischen zwei Städten wie Athen und San Francisco eindeutig angeben und messen.

Bei dieser Definition der Entfernung zwischen Objekten verwenden wir aber bereits eine gewisse Vorstellung davon, wie man sich innerhalb des Raums bewegt: Die „kürzeste Verbindung“ zwischen zwei Punkten ist eben nur deshalb die kürzeste, weil wir unterschiedliche Verbindungen miteinander vergleichen können, und dazu müssen wir Maßstäbe zwischen den Punkten anlegen.

Zum anderen wissen wir, dass unsere Welt nicht statisch ist. Das Messer wird irgendwann vom Tisch genommen, Athen und San Francisco entfernen sich (wenn auch langsam) voneinander und bewegen sich beide mit der Erde durch das Sonnensystem. In einer statischen Welt ist jedes Objekt eindeutig und dauerhaft einem Raumpunkt zugeordnet, aber in unserer Welt ist dies nicht so: Objekte ändern ihren Ort, wenn sie sich bewegen. Da wir den Raum selbst nicht beobachten können, sondern nur Objekte, müssen wir uns deshalb mit der Frage auseinandersetzen, wie sich Objekte im Raum bewegen und wie wir Raumpunkte identifizieren können, wenn die Objekte, die wir dazu verwenden, ihre räumliche Anordnung ändern.

Drei Welten

Aus dem Alltag wissen wir, dass Objekte zur Ruhe kommen, wenn keine Kräfte auf sie einwirken. Um einen Ball in Bewegung zu bringen, brauchen wir eine Kraft, wenn die Kraft aufhört, dann wird der Ball langsamer und bleibt schließlich liegen. Diese Beobachtung hat Aristoteles zur Grundlage seiner physikalischen Überlegungen gemacht (die im Mittelalter weiter verfeinert wurden).

Wir können uns als Extremfall eine Welt vorstellen, in der Objekte sofort zur Ruhe kommen, sobald keine Kraft mehr auf sie einwirkt – beispielsweise könnte die ganze Welt mit einer Art Honig angefüllt sein, durch den sich der Ball bewegen muss. Solange eine Kraft auf den Ball wirkt, bewegt er sich, sobald die Kraft aufhört, kommt er zur Ruhe.⁵

Der Übersichtlichkeit halber können wir das in ein Diagramm einzeichnen, in dem eine Achse für den Raum und die andere für die Zeit steht, also ein Raumzeit-Diagramm. (Da wir nur eine Raumachse zeichnen, muss der Ball sich auf einer geraden Linie bewegen, er könnte beispielsweise eine Straße entlangrollen oder senkrecht nach oben geworfen werden.) Ist der Ball in Ruhe, dann verläuft die zugehörige Linie im Diagramm senkrecht: Der Ort (auf der horizontalen Achse aufgetragen) ändert sich nicht, die Zeit „läuft“ aber von unten nach oben immer weiter, zu jedem Zeitpunkt ist der Ball am selben Ort. Diagramme dieser Art heißen „Raumzeit-Diagramme“, die Linien darin, die angeben, wie sich ein Objekt bewegt, heißen „Weltlinien“.

Wenn in der „Honig-Welt“ eine Kraft auf den Ball wirkt, bewegt er sich, er ändert also seinen Ort. Je schneller er sich bewegt, desto flacher verläuft die Weltlinie des Balls. Ist die Weltlinie eine Gerade, dann ändert sich der Ort des Balls in jeder Sekunde um denselben Wert – seine Geschwindigkeit (beispielsweise in Meter pro Sekunde angegeben) ist konstant. Das gilt auch für die senkrechte Weltlinie – dort ist die Geschwindigkeit gleich null. Geschwindigkeiten können auch negativ sein, nämlich dann, wenn der Ball von rechts nach links läuft. Je flacher die Weltlinie verläuft, desto größer ist die Geschwindigkeit.⁶

In der „Honig-Welt“ verläuft die Bahn des Balls auf einer Linie mit konstanter Geschwindigkeit (die nicht null ist), solange eine konstante Kraft auf ihn einwirkt. Je größer die Kraft ist, desto schneller bewegt sich der Ball, sobald die Kraft aufhört, kommt der Ball sofort zur Ruhe. Abb. 2.2a zeigt, wie das aussehen würde.

Tatsächlich hat Aristoteles geglaubt, dass sich unsere Welt in dieser Weise verhält. Unterschiedlichen Objekten ordnete er einen natürlichen Aufenthaltsort zu: Steine hatten ihren natürlichen Platz unterhalb des Wassers, das wiederum unterhalb der Luft platziert war. Objekte strebten ihrem natürlichen Aufenthaltsort zu, so dass Steine nach unten fallen, Luftblasen in Wasser aber nach oben steigen. In moderner Sprache ausgedrückt können wir sagen, dass

⁵In populärwissenschaftlichen Darstellungen wird gelegentlich das Higgs-Feld der Elementarteilchenphysik in dieser Weise veranschaulicht. Diese Vorstellung ist aber ungeeignet, denn andernfalls müssten alle massiven Objekte relativ zum Higgs-Feld zur Ruhe kommen. Tatsächlich hat das Higgs-Feld für alle Beobachter denselben Wert, unabhängig von ihrer Geschwindigkeit, so dass sich Objekte ohne Widerstand innerhalb des Higgs-Felds bewegen können.

⁶Genauer gesagt, der Betrag der Geschwindigkeit, da die Geschwindigkeit ja auch negativ sein kann.