

**ERFAHRUNG  
UND DENKEN**

Schriften zur Förderung  
der Beziehungen zwischen  
Philosophie und  
Einzelwissenschaften

Band 68

**Kausalitätsverletzungen  
in allgemeinrelativistischen  
Raumzeiten**

Von Dr. Andreas Bartels



**DUNCKER & HUMBLOT / BERLIN**

ANDREAS BARTELS

**Kausalitätsverletzungen in allgemein-  
relativistischen Raumzeiten**

**E R F A H R U N G U N D D E N K E N**

**Schriften zur Förderung der Beziehungen zwischen Philosophie und Einzelwissenschaften**

---

**Band 68**

# Kausalitätsverletzungen in allgemeinrelativistischen Raumzeiten

Von

Dr. Andreas Bartels



DUNCKER & HUMBLLOT / BERLIN

Als Dissertation vom Fachbereich 09 der Justus-Liebig-Universität  
Gießen angenommen am 19. 11. 1984.

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

**Bartels, Andreas:**

Kausalitätsverletzungen in allgemeinrelativistischen  
Raumzeiten / von Andreas Bartels. — Berlin: Duncker  
und Humblot, 1986.

(Erfahrung und Denken; Bd. 68)

ISBN 3-428-06016-4

NE: GT

Alle Rechte vorbehalten

© 1986 Duncker & Humblot GmbH, Berlin 41

Satz: Werksatz Marshall, Berlin 45; Druck: Werner Hildebrand, Berlin 65

Printed in Germany

ISBN 3-428-06016-4

*Für Cornelia*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	11
<b>Kapitel 1: Kausalität als physikalisches Konzept</b>	
I. <i>Das physikalistische Konzept der Kausalität im Spektrum philosophischer Kausalbegriffe</i> .....	16
1. Kausalität und Kontingenz: Der naturphilosophische Hintergrund des physikalistischen Konzepts .....	16
2. Vielfalt kausaler Begriffe versus physikalistische Reduktion .....	21
3. Die Folgen der Dichotomie „regelmäßige Verknüpfung“ versus „kausale Notwendigkeit“ .....	27
4. Kant über kausale Notwendigkeit .....	29
5. Konzepte kausaler Notwendigkeit heute — Alternative zum physikalistischen Kausalbegriff? .....	38
II. <i>Die Bedeutung des physikalistischen Kausalbegriffes für die Raumzeit-Philosophie</i> .....	44
1. Die Rolle der Naturphilosophie der Kausalität bei einem physikalistischen Konzept .....	44
2. Die allgemeine Relativitätstheorie (AR) als kritischer Maßstab für den Alltagssprachlichen Kausalbegriff .....	47
a) Problemstellung .....	47
b) Kausalitätsbedingungen .....	50
c) Das Beispiel: Auflösung der CTL-Paradoxie .....	53
3. Folgerungen für die Methodologie der Raumzeit-Philosophie ...	60
a) Empiristische und realistische Standpunkte zur begrifflichen Bedeutung von CTL-Modellen (K. Gödel, H. Stein, L. Sklar)	60
b) Plädoyer für eine theorienimmanente Naturphilosophie (R. Weingard, J. Earman, H. Putnam) .....	64
c) Schlußbemerkung .....	67
<b>Kapitel 2: Kausalstruktur in kosmologischen Lösungen der Feldgleichungen</b>	
I. <i>Die Kausalstruktur globaler Lösungen</i> .....	68
1. Gibt es in der AR ein Kausalproblem? .....	68

2.	Was sind kosmologische Lösungen der Feldgleichungen? .....	74
3.	Läßt sich die Steady-State-Theorie als Modell der AR interpretieren? .....	79
4.	Die Metrik der Anti-De-Sitter-Raumzeit .....	88
5.	Die Rolle von Überdeckungsräumen bei der philosophischen Beurteilung von CTL .....	91
6.	Der Verlust der globalen Cauchy-Vorhersagbarkeit in der Anti-De-Sitter-Raumzeit .....	97
7.	Dynamische Universen — Die metrische Struktur der FRW-Welten .....	101
8.	Gibt es eine realistische Interpretation von Anfangssingularitäten? .....	108
9.	Anfangssingularitäten und Kausalprinzip .....	114
10.	CTL in Universen mit räumlicher Rotation .....	121
11.	Die Taub-NUT-Raumzeit .....	130
<i>II.</i>	<i>Kausalstruktur und Singularitäten .....</i>	<i>136</i>
1.	Überblick .....	136
2.	Die Innenstruktur der Kerr-Newman-Metrik .....	140
3.	Rollentausch von räumlichen und zeitlichen Koordinaten .....	142
4.	Reisen in der Kerr-Newman-Raumzeit .....	145
5.	Energieextraktion aus der Ergosphäre (Penrose-Prozeß) .....	148
6.	Die Bedeutung des Penrose-Prozesses für den Energieflußbegriff .....	150
7.	Eine methodologische Konsequenz aus dem Penrose-Prozeß ....	151
8.	Die Struktur der Schwarzschild-Metrik (Spezialfall der Kerr-Newman-Metrik für $a = 0, e = 0$ ) .....	152
9.	CTL und Cauchy-Vorhersagbarkeit in der Kerr-Newman-Metrik .....	157
10.	Ereignishorizonte und Vorhersagbarkeit .....	162
 <b>Kapitel 3: Die physikalische Realisierung des Energie-Transfer-Modells</b>  		
<i>I.</i>	<i>Die Diskussion um die Anwendbarkeit des Transfer-Modells in der Physik</i>	<i>166</i>
1.	Probleme einer nomologischen Konzeption der Kausalität .....	166
2.	Das Energiefluß-Modell — Eine Neuauflage kausaler Metaphysik? .....	173
3.	Ein Dialog zur physikalischen Realität der Kausalrelation .....	177
	Teil I: Physikalistischer kontra nomologischer Kausalbegriff (D. Fair kontra J. Earman) .....	177
	Teil II: Kausalontologie oder epistemische Relativität der Kausalität? (A. Rosenberg kontra J. Aronson) .....	186

Teil III: Paßt der physikalische Energieflußvektor auf unseren Kausalbegriff? (D. Dieks kontra Kommentator) . . . . .	189
Schlußkommentar . . . . .	193
4. Zur Entwicklung der Beziehung von Energiefluß-Begriff und Kausalbegriff . . . . .	195
<i>II. Die Anwendung des Transfer-Modells in der AR . . . . .</i>	<i>211</i>
1. Die kausale Rolle des Gravitationsfeldes — zur Kritik der Auffassung H. Törnebohms . . . . .	211
2. Die Auszeichnung der Energie als kausale Transfergröße . . . . .	220
3. Zum Verhältnis von Ontologie und Methodologie — Überlegungen zur Strategie der kausalen Interpretation der AR . . . . .	227
<i>III. Wesentliche Merkmale der Kausalität . . . . .</i>	<i>229</i>
1. Gesetzesartigkeit, Determinismus, Kausalität . . . . .	229
2. Kausalität und Energieerhaltung . . . . .	239
3. Kausalität und Nahewirkung . . . . .	248
4. Die Methode der semantischen Verallgemeinerung . . . . .	252
<i>Anhang: Energiebedingungen in der AR . . . . .</i>	<i>255</i>

**Kapitel 4: Physikalische Semantik und die Bedeutung kosmologischer Modelle**

<i>I. Weshalb wir ein neues Konzept „physikalischer Bedeutung“ brauchen . . .</i>	<i>259</i>
<i>II. Putnams Theorie der Bedeutung . . . . .</i>	<i>262</i>
<i>III. Intendierte Modelle . . . . .</i>	<i>271</i>
<i>IV. Pragmatisierung: Die Rolle nicht-formalisierter Theorienelemente für die Bedeutung kosmologischer Modelle . . . . .</i>	<i>285</i>



## Einleitung

Begriffe und Menschen haben eines gemeinsam: behandelt man sie lieblos, so kann man von ihnen auch nichts erwarten. Ein Begriff, der heute sehr oft lieblos behandelt wird, ist der Begriff der Kausalität. Sorglos wird Kausalität einmal mit Determinismus gleichgesetzt, ein anderes Mal mit Vorhersagbarkeit oder schlicht Gesetzmäßigkeit. Da man weithin dem Begriff der Kausalität keine besondere Kraft zubilligt, von der wir bei unseren Versuchen, die Wirklichkeit zu verstehen, profitieren könnten, ist eine präzise Verwendung selbst in wissenschaftlichen Kontexten nicht üblich. Natürlich gibt es auch viele sorgfältige Bemühungen um den Kausalbegriff. Ein gutes Beispiel ist J. L. Mackies scharfsinniges Werk „The Cement of the Universe“ von 1974. Man findet hier eingehende Analysen der Frage, wie die Situationen beschaffen sein müssen, in denen wir zurecht kausale Begriffe verwenden. Begriffsexplikationen dieser Art behandeln Kausalität als ein Ordnungsschema, an dessen Konturen hier und da zu feilen ist, um dem Ziel näher zu kommen, es an genau jene Klasse realer Vorgänge anzupassen, die Konsistenz und Adäquatheit zum Sprachgebrauch optimiert. Aber auch ein Korsett, das gut sitzt, ist ein Korsett; ein Begriff, der darin steckt, ist für Entdeckungsreisen ungeeignet.

Diese Einschränkung der Bewegungsfreiheit geht auf David Hume zurück. Seit Hume konnte eine Philosophie sich nur dann als modern verstehen, wenn sie die „Hervorbringung“ einer Wirkung durch ihre Ursache als psychologische Metapher oder — wie bei Kant — als notwendigen Denkmodus betrachtete, jedenfalls aber als etwas, das den Besonderheiten unserer Erkenntnis, nicht den Eigenschaften der erkannten Welt zugehört. Als empirischer Gehalt der Kausalrelation war nur mehr eine formale Struktur von Ereignisfolgen übriggeblieben, die meist so spezifiziert wurde, daß sie die Vorhersagbarkeit von Ereignissen garantierte (z. B. in der Formel „gleiche Ursachen, gleiche Wirkungen“).

Albert Einsteins „Allgemeine Relativitätstheorie“ hat uns in mehreren Hinsichten neue Welten eröffnet. In einer Hinsicht trifft dies auf die Vielzahl von Weltmodellen zu, die mithilfe dieser Theorie konstruiert werden konnten. In diesen Modellen, die physikalisch mögliche Universen darstellen, ist eine Formenvielfalt kausaler Beziehungen enthalten (und zum Teil noch verborgen), die so gar nicht zum Bild eines „entzauberten“, blutleer gewordenen Kausalbegriffes paßt. Da gibt es mögliche kausale Prozesse, die an bestimmten Stellen der raumzeitlichen Welt beginnen oder abbrechen,

Signale, die keine Spuren in der Vergangenheit hinterlassen haben, Horizonte, die keine Wirkungen nach außen dringen lassen und gar Zeitreisen, die in die eigene Vergangenheit zurückführen können. Wenigstens zwei der eben genannten Arten von Ereignisfolgen verletzen fest verwurzelte Überzeugungen von der formalen Struktur kausaler Prozesse. Signale, die in das Wirkungsgefüge der Zukunft eingreifen, ohne an einem vergangenen Zeitpunkt datierbar zu sein, zerstören die Vorhersagbarkeit des kausalen Zusammenhangs, während Zeitreisen nicht nur der formalen Eigenschaft der Nicht-Reflexivität der Kausalrelation widersprechen, sondern unseren elementaren logischen Instinkt alarmieren. Schließlich scheint es hier möglich, durch einen nachträglichen Eingriff in die Vergangenheit Gegenwart und Zukunft zu verändern. Die Verwendung des Terminus „Kausalitätsverletzung“ wirkt vor allem in diesem Fall nur allzu plausibel.

Dennoch wird sich im Gang der vorliegenden Untersuchung herausstellen, daß dieser Terminus streng genommen ungerechtfertigt ist und man besser von ungewöhnlichen, oder wenn man möchte, von „pathologischen“ Kausalstrukturen sprechen sollte. Die Weltmodelle nämlich, denen diese Kausalstrukturen entstammen, sind sämtlich ebenso strenge und verlässliche mathematische Derivate von Einsteins Theorie wie jene Modelle, die angenähert den Kosmos beschreiben, in dem wir leben. Sie teilen daher mit ihnen auch die Eigenschaft, daß die möglichen physikalischen Ereignisse, die an ihren Raum-Zeit-Punkten stattfinden könnten, im sehr Kleinen genauso miteinander verknüpft sind, wie es durch die Spezielle Relativitätstheorie beschrieben wird, d. h. sie tragen an jeder Stelle dieselbe kausale Struktur wie jene gewöhnlichen Modelle. Wenn sie daher global andere formale Eigenschaften für Ereignisfolgen zulassen, so hat dies den Charakter eines im Kleinen festgelegten Themas, das im Großen in ungewohnter Weise variiert wird. Die „pathologischen“ Kausalstrukturen sind daher als echte, physikalisch mögliche Kausalstrukturen aufzufassen. Daß sie auch in logischer Weise unbedenklich sind, werde ich im ersten Kapitel dieses Buches für den problematischen Fall der Zeitreisen zeigen, indem ich auf Fehler in den zahlreichen Zeitreisen-Paradoxa hinweise.

Wenn diese Argumentationsarbeit geleistet ist, wird der philosophische Ertrag der Untersuchung sichtbar werden. Einsteins „Allgemeine Relativitätstheorie“ hat noch in einer weiteren Hinsicht neue Welten eröffnet. Sie hat gezeigt, wie tief in die Grundstrukturen unserer Erfahrung und unseres Denkens spezifische physikalische Eigenschaften unserer Welt eingreifen. Auch der auf die formale Struktur konstanter Ereignisfolgen verengte Kausalbegriff ist ein Ergebnis dieses Adaptionsprozesses. So wichtig erfahrungsnaher Begriffe auch für unsere Orientierung in der Alltagswelt sind, so hinderlich und irreführend ist die für sie kennzeichnende Verengung in kognitiven Unternehmungen, die uns die Wirklichkeit durch den Kontrast

mit einem Hintergrund von Möglichkeiten zu Bewußtsein bringen sollen, also in der wissenschaftlichen Forschung. Für Entdeckungsreisen braucht man Begriffe, die unabhängig sind von den kontingenten Eigenschaften unserer Welt und die Weltmodelle, die uns durch Einsteins Theorie bereitgestellt wurden, sind Wegmarken, die uns zeigen, welcher Ballast abgeworfen werden muß.

Im Rahmen meiner Untersuchung werde ich einen Kausalbegriff verwenden, der bis auf jene Kernbedeutung entschlackt ist, die als der Baustein begriffen werden kann, mit dem alle großräumigen kausalen Beziehungen in Modellen der Allgemeinen Relativitätstheorie errichtet sind: Energie-Impuls-Transfer zwischen infinitesimal benachbarten Ereignispunkten. So sprengt die Formenvielfalt kausaler Strukturen in der Allgemeinen Relativitätstheorie nicht nur einen zu engen Kausalbegriff auf, sondern induziert gleichzeitig die Suche nach einer physikalischen Realisation des Begriffs. Das Vorliegen einer kausalen Beziehung wird dadurch zu einer empirischen Angelegenheit. Die Kausalität ist nicht mehr länger nur Ordnungsbegriff für das zu Erforschende, sondern wird selbst zum empirischen Forschungsgegenstand.

Drei Probleme sind es, die dieses Konzept zum Scheitern bringen könnten. Sie werden vor allem im dritten Kapitel behandelt. Das erste Problem stellt sich mit der Frage, ob Energie-Impuls-Transfer wirklich die ihm zugeordnete Rolle erfüllen kann, die Kausalrelation zu kennzeichnen. In drei Dialogen zwischen Befürwortern und Gegnern des Energiefluß-Modells werden Argumente zusammengetragen, die, wie ich glaube, die Leistungskraft und den universellen Geltungsanspruch dieses Modells demonstrieren. Einen besonderen Problemfall für das Energiefluß-Modell stellt das Gravitationsfeld in Einsteins Theorie aufgrund der Nichtlokalisierbarkeit seines Energieinhaltes dar. Durch eine Verallgemeinerung des Energieflußbegriffs läßt sich die Anwendbarkeit des Modells jedoch auch hier sichern. Dabei handelt es sich um keine ad hoc-Maßnahme; die Überlegungen zur Entwicklung der Beziehungen zwischen Energiefluß- und Kausalbegriff zeigen vielmehr, daß parallel zur Entstehung und Ablösung der neuzeitlichen Gravitationstheorien ein begrifflicher Prozeß stattfand, in dem die ursprünglichen physikalischen Intuitionen von Verursachung als Energiefluß auf die Abstraktionsstufe der jeweils neuen Theorie gehoben wurden und sich damit kontinuierlich mitentwickelten.

Ein zweites Problem für den hier vertretenen Ansatz entsteht durch die Forderung, bisher für wesentlich gehaltenen Eigenschaften kausaler Beziehungen, der Energieerhaltung, Nahewirkung, Gesetzesartigkeit und verschiedenen Formen der Vorhersagbarkeit, bzw. des Determinismus, innerhalb des neuen Konzepts einen Platz zuzuweisen. Es wird sich herausstellen, daß Merkmale wie das Nahewirkungsprinzip begrifflich mit dem