

**OSTWALDS KLASSIKER
DER EXAKTEN WISSENSCHAFTEN
Band 287**

**Die Welt als Raum und Zeit
(1923)**

von
Alexander Friedmann

**Übersetzung aus dem Russischen,
Einführung und Anmerkungen
von Georg Singer**



Europa-Nr. 57723

4., bearbeitete Auflage 2014

Druck 5 4 3 2 1

ISBN 978-3-8085-5773-0

**Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Jede Verwertung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom
Verlag schriftlich genehmigt werden.**

**Der Inhalt des Werkes wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen
Autoren und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Rat-
schlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.**

**© 2014 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG,
42781 Haan-Gruiten
<http://www.europa-lehrmittel.de>**

**Umschlaggestaltung: dreimaster medienwerkstatt, 60388 Frankfurt/Main
Satz: Birgit Cirksena · Satzfein, 13158 Berlin
Druck: Rosch-Buch Druckerei GmbH, 96110 Scheßlitz**

Inhalt

Vorwort	V
Einführung	XI
Anmerkungen zur Einführung	LX
Zur Übersetzung	LXXXII
Alexander Friedmann: Die Welt als Raum und Zeit	1
Kapitel 1: Raum	
§1. Messung von Größen	7
§2. Arithmetisierung des Raumes	14
§3. Die Metrik des Raumes	20
§4. Die Krümmung des Raumes	32
Kapitel 2: Zeit und Welt	
§5. Zeit	51
§6. Bewegung	60
§7. Die Welt	73
Kapitel 3: Gravitation und Materie	
§8. Alte und neue Mechanik	83
§9. Gravitation	88
§10. Materie und Struktur des Weltalls	100
§11. Allgemeine Folgerungen aus dem Relativitätsprinzip ..	112
Anmerkungen zur Übersetzung	117
Anhang	141
1. D. Hilbert: Brief an den Kurator der Universität Göttingen	141
2. V. Fréedericksz: Brief an David Hilbert	142
Zeittafel zu Leben und Werk Alexander Friedmanns	143
Quellen- und Literaturverzeichnis	147

Vorwort

„Auf der Grundlage der genannten Voraussetzungen ergeben sich hauptsächlich zwei Weltalltypen: 1) *der stationäre Typ* – die Raumkrümmung ändert sich nicht mit der Zeit, 2) *der veränderliche Typ* – die Raumkrümmung ändert sich mit der Zeit.“ So lapidar resümierte Alexander Friedmann im Spätsommer 1922, als er die vorliegende Abhandlung verfaßte, die bis dahin erzielten Ergebnisse seiner Untersuchungen zum kosmologischen Problem. *Mir kak prostranstwo i vremja – Die Welt als Raum und Zeit* – erschien Anfang 1923 in Petrograd und war das erste, für ein Jahrzehnt auch das einzige Buch, in dem die Existenz nichtstatischer Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen für ein materieerfülltes Weltall erörtert wurde. Die Entdeckung derartiger Lösungen hat Friedmann im September 1922 in der angesehenen *Zeitschrift für Physik* bekannt gemacht. Wie die umgehende Reaktion Einsteins beweist, ist der Artikel zur Kenntnis genommen worden, hatte jedoch ebenso wie das Buch und wie eine zweite 1924 in derselben Zeitschrift publizierte Arbeit mit weiteren wichtigen Resultaten auf die Entwicklung der Kosmologie keinen Einfluß. Alexander Friedmann starb 1925 im Alter von 37 Jahren, und es war ihm nicht vergönnt, die Wiederentdeckung und weltweite Anerkennung seiner wissenschaftlichen Leistung mitzuerleben.

Heute gilt Friedmann als der Begründer der Theorie der uniformen Weltmodelle, welche auf der Idealisierung beruht, die Materieverteilung im Universum sei homogen und isotrop und als eine vollkommene Flüssigkeit mit Galaxien als nicht miteinander wechselwirkenden Teilchen beschreibbar. Gerade diese Modelle sind es, die der modernen Standardkosmologie, insbesondere der Lehre von der Expansion des Weltalls, zugrunde liegen. *Die Welt als Raum und Zeit* ist Alexander Friedmanns Darstellung des physikalischen Fundaments dieser Kosmologie, der allgemeinen Relativitätstheorie Albert Einsteins. Die Abhandlung dokumentiert authentisch Friedmanns originelle Sichtweise und Einschätzung der Einsteinschen

Lehre. Der Aufsatz war ursprünglich zum Abdruck in einer philosophischen Zeitschrift vorgesehen, deren Leser mit den wesentlichen Voraussetzungen, Inhalten und Konsequenzen des „großen Relativitätsprinzips“ bekannt gemacht werden sollten. *Die Welt als Raum und Zeit* ist jedoch keine gemeinverständliche Einführung im gewöhnlichen Sinn. Wenngleich der mathematische Formalismus nur angedeutet wird, gaukelt Friedmann dem Leser nicht vor, daß sich ein wirkliches Verständnis der allgemeinen Relativitätstheorie ohne gründliche Kenntnisse in der höheren Mathematik erlangen ließe. Besonderes Augenmerk richtet der Autor auf die Darlegung der logischen Struktur der Theorie und auf begriffliche Klarheit. Schwierige Sachverhalte werden nicht mit Stillschweigen übergangen oder durch unangemessene Simplifizierung verschleiert, sondern mit sicherem Gespür für die Gedanken des Lesers elementarisiert und geduldig erläutert. All das macht dieses kleine Werk zu einem echten Klassiker naturwissenschaftlicher Literatur, anregende und bereichernde Lektüre für jeden, den die Geschichte der Physik und der Astronomie des 20. Jahrhunderts interessiert.

Die Abhandlung liegt nunmehr erstmalig auf deutsch vor, obwohl der Wunsch nach einer deutschen Ausgabe schon an Friedmann persönlich bei dessen Besuch in Potsdam im Jahre 1923 herangetragen worden war. Auch erinnert sich Hans-Jürgen Treder daran, daß ihm Anfang der siebziger Jahre Wladimir Fock das Buch Friedmanns sehr empfohlen und zu übersetzen versprochen habe. Leider starb Fock, bevor er sein Versprechen verwirklichen konnte.

Als ich vor einigen Jahren begann, *Mir kak prostranstwo i wremja* auszugsweise zu übersetzen, befaßte ich mich gerade mit der Frage, weshalb Friedmanns Entdeckung nichtstatischer Weltmodelle von Einstein zuerst so kategorisch abgelehnt und dann auch nur widerstrebend anerkannt wurde. Nachdem ich meine Überlegungen hierzu in einem Artikel für *Die Sterne* (1996) dargelegt hatte, wurde von verschiedenen Seiten Interesse an meiner Übersetzung bekundet, und man ermunterte mich, eine vollständige deutsche Fassung zu publizieren. Es erschien mir freilich angebracht, Friedmanns Text nicht kommentarlos zu präsentieren. Eine Einführung sowie erläuternde und textkritische Anmerkungen sollen dem heutigen Leser

die Einordnung des Aufsatzes in den physik-, geistes- und zeitgeschichtlichen Kontext erleichtern. Freuen würde mich, wenn die vorliegende Arbeit zu weiter gehender und tiefer schürfender Forschung anregen und dafür als Grundlage von Nutzen sein könnte.

Ich möchte hier die Gelegenheit wahrnehmen, allen Personen zu danken, die auf die eine oder andere Weise mein Projekt unterstützt und gefördert haben. An erster Stelle bedanke ich mich bei den Damen und Herren der Regionalbibliothek Weiden. Ohne die endlose Geduld und umfassende Sachkenntnis, mit der sie unzählige Fernleihaufträge bearbeiteten, hätte meine Arbeit nicht zustande kommen können.

Für ihre Hilfe beim Auffinden von Quellen danke ich der Leiterin der Tolstoi-Bibliothek München, Frau Erschow, der Syndika der Akademie der Wissenschaften zu Göttingen, Frau Dr. Rickmann, Herrn Dr. Haenel vom Archiv der Universität Göttingen, dem Leiter der Abteilung Handschriften und Alte Drucke der Universitätsbibliothek Göttingen, Herrn Dr. Rohlfing, dem Bibliothekar des Mathematischen Instituts der Universität Göttingen, Herrn Matthes, Herrn Lohmar vom Stadtarchiv Göttingen, den Herren Dr. Andreeßen und Dr. Wasilewitsch von der Osteuropa-Abteilung der Staatsbibliothek Preußischer Kulturbesitz zu Berlin und Herrn Dr. Superfin von der Forschungsstelle Osteuropa der Universität Bremen. Besonders bedanke ich mich in diesem Zusammenhang bei Herrn Dr. Wolfgang Dick für die Beschaffung eines Abdrucks der Erstausgabe von *Mir kak prostranstwo i wremja* aus der Ukraine.

Für die Erlaubnis zum Zitieren aus Quellen und zum Veröffentlichlichen von Quellen gilt mein Dank dem Archiv der Universität Göttingen (Sekretariats- und Kuratorialakten), der Abteilung Handschriften und seltene Drucke der Universitätsbibliothek Göttingen (Briefwechsel Frederix–Hilbert) und dem Mathematischen Institut der Universität Göttingen (Vorlesungsnachschriften Hilbert).

Für die wohlwollende Ermutigung, mit der sie mein Vorhaben begleiteten und förderten, sage ich herzlichen Dank Herrn Prof. Dr. Hilmar Dürbeck, Herrn Prof. Dr. Wolfgang Priester, Herrn Prof. Dr. Hans-Jürgen Treder und Herrn Dr. Wolfgang Dick. Ganz besonders bedanke ich mich bei den Herren Dürbeck, Treder und Dick sowie

bei meiner Frau Agnes Singer für das kritische Lesen vorläufiger Fassungen des Manuskripts und für die hilfreichen Hinweise zu dessen Verbesserung.

Der Arbeitskreis Astronomiegeschichte in der Astronomischen Gesellschaft vermittelte mir den Kontakt zum Verlag Harri Deutsch; hierfür danke ich dem Vorsitzenden und dem Sekretär des Arbeitskreises, den Herren Prof. Dr. Peter Brosche und Dr. Wolfgang Dick, sowie Herrn Prof. Dr. Hilmar Dürbeck.

Schließlich bedanke ich mich beim Verlag Harri Deutsch, in erster Linie bei Frau Christine Bönisch, für die unkomplizierte und stets harmonische Zusammenarbeit.

Weiden, im Januar 2000

Georg Singer

Zur vierten Auflage

Seit 125 Jahren gibt es *Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften*. Ich freue mich, dass der Verlag Europa-Lehrmittel diese traditionsreiche Buchreihe weiterführt und zu ihrem Jubiläum eine Neuauflage des Bandes 287 erscheinen kann. *Die Welt als Raum und Zeit* hat zweifellos ihren Platz in dieser Reihe verdient, gibt Alexander Friedmann darin doch eine sehr fundierte und gleichwohl gut lesbare Darstellung der allgemeinen Relativitätstheorie und – wie er sagt – ihres Versuchs, ein Weltbild zu entwerfen. Was der Autor vor nun beinahe einem Jahrhundert zur Behandlung des kosmologischen Problems beisteuerte, nämlich den Nachweis der Existenz nichtstatischer Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen für ein materieerfülltes Universum, markiert aus heutiger Sicht einen Entwicklungssprung des wissenschaftlichen Konzepts vom Weltganzen. Noch in unseren Tagen muss man den Mut und das Selbstbewusstsein Friedmanns bewundern, mit dem er damals die Auseinandersetzung um seine Entdeckung mit dem Geistesriesen Albert Einstein führte und schließlich gewann.

Aufgrund neu erschlossener Quellen unterscheidet sich die vorliegende Ausgabe von der ersten Auflage vor allem durch Verbesserungen und Ergänzungen in der Einführung und den zugehörigen Anmerkungen. Das Literaturverzeichnis wurde dementsprechend um einige Titel erweitert. Der Friedmann-Text ist unverändert.

Weiden, im April 2014
Georg Singer

Die Umschrift russischer Namen und Begriffe erfolgt grundsätzlich nach der gängigen phonetischen Duden-Transkription. Nur innerhalb rein bibliographischer Angaben wird die deutsche Bibliothekstransliteration verwendet.



Alexander Alexandrowitsch Friedmann
4.6.1888–16.9.1925

Einführung

1. Alexander Friedmann – allzu kurze Karriere eines vielseitigen Wissenschaftlers

„The Man who Made the Universe Expand“ lautet der Ehrentitel, den Alexander Friedmann¹ von den Herausgebern der englischen Übersetzung einer ihm gewidmeten russischen Biographie zugesprochen erhält. Alexandr Alexandrowitsch Fridman², wie die korrekte Transkription seines Namens lautet, vollbrachte die wissenschaftliche Großtat, für die er nach Jahren der Nichtachtung und der ideologischen Diffamierung mittlerweile weltweit den verdienten Ruhm genießt, auf einem Gebiet, auf dem er seinerzeit ein unbekannter Neuling war. Als erster hatte Albert Einstein selbst die allgemeine Relativitätstheorie auf das kosmologische Problem, die Frage nach der raumzeitlichen Struktur des Weltganzen, angewendet.³ Bald darauf bereicherte Willem de Sitter die Diskussion um gewichtige Gesichtspunkte und löste dadurch eine heftige Kontroverse aus.⁴ Als das Thema wenige Jahre später von Friedmann aufgegriffen und von Grund auf neu abgehandelt wurde, blieben dessen Darlegungen zunächst weitgehend unbeachtet und ohne Wirkung. Seine Untersuchungen waren der Zeit voraus und fanden erst lange nach dem Tod ihres Autors die ihrer Bedeutung und Tragweite entsprechende Würdigung.

Friedmanns Beitrag zum kosmologischen Problem besteht im wesentlichen darin, gezeigt zu haben, daß die durch das kosmologische Glied erweiterten Einsteinschen Feldgleichungen für die Welt als Ganzes außer der von Einstein vorgeschlagenen statischen Lösung mit Materie und der von de Sitter angegebenen scheinbar statischen Lösung ohne Materie auch nichtstatische Lösungen (mit positiver oder negativer konstanter Raumkrümmung) bei nicht verschwindender Materiedichte zulassen. Er legte diesen Befund in zwei kurzen schriftlichen Arbeiten nieder, die während eines Zeit-

raums von etwa zwei Jahren entstanden. Die beiden Aufsätze „Über die Krümmung des Raumes“ und „Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes“ erschienen zuerst in deutscher Sprache⁵ in den Bänden 10 (1922) bzw. 21 (1924) der *Zeitschrift für Physik*.⁶ Friedmann nennt als Abschlußdatum für den ersten Artikel den 29. Mai 1922, für den zweiten Artikel nur „November 1923“⁷. Dazwischen lag die Debatte mit Einstein über die Möglichkeit der Existenz nichtstatischer Lösungen der Feldgleichungen für das Weltganze.⁸ Hierzu gehören zwei jeweils nur wenige Zeilen umfassende Äußerungen Einsteins in der *Zeitschrift für Physik*, und zwar in Band 11 (1922), datierend vom September 1922, und in Band 16 (1923), bei der Redaktion eingegangen am 31. Mai 1923, sowie ein erläuternder Brief Friedmanns an Einstein vom 6. Dezember 1922.⁹ In die damit umrissene Schaffensperiode Friedmanns fallen schließlich auch Abfassung und Veröffentlichung der Schrift *Mir kak prostranstwo i wremja*, deren deutsche Übersetzung *Die Welt als Raum und Zeit* hier erstmals vorgelegt wird. Als Abschlußdatum dieses Aufsatzes nennt Friedmann den 5. September 1922.

Mit der Herausgabe von *Mir kak prostranstwo i wremja* in deutscher Sprache wird unter anderem beabsichtigt aufzuzeigen, daß Friedmanns Arbeit am kosmologischen Problem nicht nur eine Episode war. Tatsächlich beschäftigte sich Friedmann ab 1920 bis zu seinem frühen Tod 1925 so intensiv mit allgemeiner Relativitätstheorie wie es seine Hauptaufgaben zuließen, denn im wesentlichen konnte er sich nur während seiner raren Freizeit diesem Problemkreis widmen.

Als Friedmann 1913, gleich nach Ablegung des Magisterexamens an der mathematischen Abteilung der Physikalisch-mathematischen Fakultät der Universität Sankt Petersburg, am Aerologischen Institut des Physikalischen Hauptobservatoriums Anstellung gefunden hatte, wurde ihm von dessen Leiter B. B. Golizyn¹⁰ die theoretische Meteorologie als Arbeitsbereich zugewiesen. Trotz verschiedener Einsätze ließ Friedmann auch während des Krieges von der Forschung auf dem Gebiet der Dynamik der Atmosphäre nicht ab. Er studierte die vertikale Temperaturverteilung in der Lufthülle der

Erde, untersuchte die Entstehung von Strömungen und die Bildung von Wirbeln. Ab 1920 hatte Friedmann als Dozent für Mathematik und Mechanik an der Universität und als Professor für Mechanik am Polytechnischen Institut in Petrograd umfangreiche Vorlesungsverpflichtungen¹¹ und überdies Dienst am Physikalischen Hauptobservatorium¹². Daneben verfaßte er eine Dissertation über die Hydrodynamik kompressibler Flüssigkeiten und führte Studien durch, derenhalb er heute als einer der Begründer der Turbulenztheorie gilt. Als man ihn schließlich 1925 zum Leiter des Geophysikalischen Hauptobservatoriums in Leningrad ernannte, hatte er ein weltweit einmaliges Arbeitsprogramm zur theoretischen Meteorologie und zur Erforschung der Atmosphäre entworfen und zu verwirklichen begonnen.

Daß Friedmann neben der enormen Belastung als Hochschullehrer und der intensiven und erfolgreichen Forschungstätigkeit im Bereich der angewandten Mechanik noch Zeit und Kraft für selbständige Studien auf einem weiteren anspruchsvollen Arbeitsgebiet gehabt haben soll, erscheint beinahe unglaublich – und doch war es so. Friedmanns umwälzende Entdeckungen zum kosmologischen Problem sind – wie noch im einzelnen aufgezeigt werden wird – aus einer tiefschürfenden und eigenständigen Durchdringung der allgemeinen Relativitätstheorie hervorgegangen. Einen aussagekräftigen Eindruck von dieser „Nebenbeschäftigung“ könnte wohl das Lehrbuch *Osnovy teorii otноситelnosti* (Grundlagen der Relativitätstheorie) vermitteln, an dessen Herausgabe Friedmann zusammen mit W. K. Frederix¹³ ab 1922 arbeitete und das sich nicht zuletzt in der Darstellung durch größere Klarheit und Genauigkeit von den schon existierenden Einführungen unterscheiden sollte.¹⁴ Leider ist von diesem Werk nur noch der erste, der Tensorrechnung gewidmete Teil erschienen. Im September 1925 beendete der Tod jäh die so vielseitige und ertragreiche wissenschaftliche Tätigkeit des siebenunddreißigjährigen Alexander Friedmann.

2. Wsewolod Frederix – Relativitätstheorie im Reisegepäck

Rußland war durch die Wirren des Krieges, der Revolutionen und des Bürgerkrieges lange von der internationalen Wissenschaftsgemeinschaft abgeschnitten, persönliche Kontakte zu ausländischen Fachkollegen sowie die Versorgung mit fremdsprachiger Fachliteratur waren jahrelang unterbrochen gewesen.¹⁵ Die Lage begann sich erst zu Beginn der zwanziger Jahre allmählich zu bessern, als nach der Aufhebung der über Sowjetrußland nach der Oktoberrevolution verhängten Blockade alte Verbindungen zum Westen wiederhergestellt und neue geknüpft werden konnten.¹⁶ In dieser Situation gewann der sich in dem Physiker W. K. Frederix personifizierende Wissenstransfer außergewöhnliche Bedeutung. Frederix¹⁷ hatte nach der Promotion bei Guye¹⁸ in Genf sein Studium ab 1910 in Göttingen fortgesetzt und war vom 1. 9. 1911 bis 31. 8. 1912 Hilfsassistent am Physikalischen Institut bei W. Voigt¹⁹. Diese Stelle erhielt er für die Zeit vom 1. 4. 1913 bis 31. 3. 1915 nochmals übertragen, als russischer Staatsbürger wurde er jedoch zu Anfang des Krieges entlassen.²⁰ Während seiner Assistententätigkeit schloß Frederix Bekanntschaft auch mit David Hilbert²¹. Als er dann seine Stellung an der Universität verlor, verschafften ihm Voigt und Hilbert Möglichkeiten, privat in Göttingen weiterzuarbeiten. Bekanntlich begann Hilbert zu dieser Zeit, ausgehend von Mies Überlegungen zur elektromagnetischen Struktur der Materie²² einerseits und von Einsteins Grundgedanken zu einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und Gravitationstheorie andererseits sein altes Wunschziel eines axiomatischen Aufbaus der Physik²³ verfolgend die erste allgemein kovariante einheitliche Feldtheorie zu entwickeln, welche er der Göttinger Akademie schließlich im November 1915 unter dem Titel „Die Grundlagen der Physik“ vortrug.²⁴ Die Quellen lassen keinen Zweifel daran, daß Frederix dem engeren Kreis um Hilbert angehörte, in dem diese Studien betrieben wurden.²⁵ Frederix war an den Vorarbeiten zu Hilberts Vorlesung über allgemeine Relativitätstheorie „Die Grundlagen der Physik“ im Wintersemester 1916/17 so maßgeblich beteiligt, daß dieser sich mit der Bitte, zu

gestatten, daß Frederix „als private Hülfe für mich“ der Vorlesung beiwohnen dürfe, schriftlich an den Kurator der Universität wandte.²⁶ Auch ist Frederix Verfasser eines Aufsatzes mit dem Titel „Bahnkurven im zentrisch-symmetrischen Gravitationsfelde“, den Hilbert Anfang 1917 der Göttinger Akademie vorlegte²⁷ und auf den er an entsprechender Stelle in der „Zweiten Mitteilung“ und in der Vorlesung²⁸ ausdrücklich hinwies.

Von besonderer Bedeutung für die Rolle, die Frederix noch zu spielen hatte, ist des weiteren, daß man im Hilbert-Kreis stets über Einsteins Auffassungen und Fortschritte gut unterrichtet war. Im Sommer 1915 hatte Einstein in einer Vortragsreihe den Göttingern den aktuellen Stand seiner Untersuchungen persönlich dargelegt. Als Einstein und Hilbert im November 1915 sehr intensiv an ihrer jeweiligen Lösung des Gravitationsproblems arbeiteten und Publikationen vorbereiteten, standen sie miteinander in engem Briefkontakt.^{28a} Im März 1917 begann Einstein mit Felix Klein²⁹ eine Korrespondenz, die bis 1918 fort dauerte und sich unter anderem auf die unterschiedlichen Herangehensweisen an die allgemeine Relativitätstheorie bezog. Hauptthema des Briefwechsels war aber das kosmologische Problem, an dem Klein stark interessiert war. Er korrespondierte gleichzeitig mit de Sitter und erörterte mit Einstein beide kosmologischen Modelle. Dabei stand Klein allzeit mit Hilbert in Gedankenaustausch und ließ sich offenbar auch von Frederix zuarbeiten.^{29a} Während des Sommersemesters 1917 hörte der Hilbert-Schüler R. J. Humm³⁰ Einsteins Vorlesung über allgemeine Relativitätstheorie in Berlin und diskutierte mit Einstein einige Male über die Meinungsunterschiede zwischen „Berlin“ und „Göttingen“.³¹ Nach seiner Rückkehr nach Göttingen wurde Humm, der auch mit Frederix gut bekannt war, Assistent bei Hilbert und arbeitete selbst über allgemeine Relativitätstheorie.

Als Frederix schließlich im Sommer 1918 die Heimreise nach Rußland antrat, war er demnach hervorragend qualifiziert, um Information über den aktuellen Stand auf dem neu erschlossenen Gebiet der physikalischen Wissenschaft zu überbringen. Ab 1919 trat er in Petrograd in Erscheinung, unter anderem als Dozent an der Universität, und um 1920 hielt er die ersten unter dem Thema „Das Relati-

vitätsprinzip“ angekündigten Vorlesungen über allgemeine Relativitätstheorie.³² Eine gute Vorstellung von dem, was Frederix vortrug, vermittelt sein Artikel „Obschtschi prinzip otnossitelnosti Einschteina“ (Das allgemeine Relativitätsprinzip Einsteins).³³ Darin werden eingangs die wichtigsten der seit 1914 erschienenen Veröffentlichungen aufgeführt, wobei außer Einsteins fundamentalen Arbeiten nur noch Lorentz' „On Einstein's Theory of gravitation“ (1917;1918), Hilberts „Grundlagen der Physik“ (1915; 1917) sowie Weyls *Raum Zeit Materie* (1918) Erwähnung finden.³⁴ Als nächstes geht Frederix auf die Wechselbeziehung zwischen Geometrie und Physik ein. Mit Verweis auf *Wissenschaft und Hypothese* von Henri Poincaré³⁵ hebt er hervor, daß nach der Definition der geometrischen Grundbegriffe mittels physikalischer Vorrichtungen und Prozeduren die Erfahrung darüber Auskunft geben müsse, welcher Art die Geometrie des physikalischen Raumes ist.³⁶ Hierauf folgt die Erörterung der Grundannahmen der Einsteinschen Theorie, die von Frederix in vier Thesen formuliert werden. In der ersten These wird das Riemannsche Linienelement als grundlegend für die vierdimensionale Geometrie von Raum und Zeit erklärt. Die Analyse des Machschen Paradoxons^{36a} habe Einstein erkennen lassen, was Frederix als zweite These formuliert: „Nicht nur Übergänge von einem geradlinig-gleichförmig bewegten System zu einem ebensolchen, sondern überhaupt alle Koordinatentransformationen sind zulässig“.³⁷ Die dritte These bezieht sich auf die Deutung der metrischen Koeffizienten als Gravitationspotentiale, wobei Frederix auf den Zusammenhang mit dem „Äquivalenzprinzip“ hinweist. Das Postulat von der Invarianz der Naturgesetze unter beliebigen Koordinatentransformationen wird als vierte These aufgeführt. Hieran schließt sich die Herleitung der Feldgleichungen an, wobei Frederix ausdrücklich dem Wege Hilberts folgt, da Einsteins Verfahren der Verallgemeinerung der Poisson-Gleichung „weder so einfach noch so eindeutig ist, daß die volle Bedeutung der erzielten Resultate ohne weiteres erkennbar wird“.³⁸ Danach folgen einige Beispiele. Besonders ausführlich und methodisch eng angelehnt an Hilberts zweite Mitteilung behandelt Frederix das Gravitationsfeld eines Massenpunkts einschließlich Periheldrehung und Lichtablenkung. Hier sowie bei der Bespre-

chung von Uhrengang und Rotverschiebung der Spektrallinien im Gravitationsfeld am Ende der Arbeit erwähnt er, daß die bisherigen Versuche, die Theorie durch Beobachtung zu bestätigen, positiv verlaufen seien. Dessen ungeachtet, so hatte Frederix schon eingangs erklärt, erblicke er die Hauptbedeutung der Einsteinschen Theorie im Grundsätzlichen.

3. Alexander Friedmanns Interesse an der allgemeinen Relativitätstheorie

Im Mai 1920 kehrte Friedmann von der Universität Perm, wo er eine Professur für Mechanik innegehabt hatte, in seine Heimatstadt zurück. Schon aus Petrograd schrieb er in einem Brief an Paul Ehrenfest³⁹, daß er sich „mit der Axiomatik des kleinen Relativitätsprinzips befaßt“ habe und „sehr gerne das große Relativitätsprinzip studieren“ würde.⁴⁰ Zu dieser Zeit beteiligte sich Friedmann bereits an der Arbeit der „Atomkommission“ des Staatlichen Instituts für Optik, der auch Frederix angehörte, und genauso wie Frederix war er Dozent an der Universität. So liegt es nicht fern, zu vermuten, daß Friedmann bei der Einarbeitung in Einsteins neue Lehre von seinem Kollegen Anregung und Unterstützung erhielt. Friedmann konnte auf Frederix als kompetenten Gesprächspartner zählen und sich von ihm aus erster Hand mit der besonderen Sichtweise Hilberts bekannt machen lassen. Gestützt wird diese Vermutung durch W. A. Fock, der sich erinnert, Frederix und Friedmann seien „gleich zu Beginn der zwanziger Jahre kurz nach der Aufhebung der Blockade über Sowjetrußland“ in einem Seminar am Physikalischen Institut der Universität gemeinsam als Referenten über Relativitätstheorie aufgetreten.⁴¹

Friedmann hat sich gewiß sehr für die ihr zu Grunde liegende Mathematik interessiert, auslösendes Moment für seine nunmehr einsetzende intensive Beschäftigung mit der allgemeinen Relativitätstheorie scheint jedoch die Faszination gewesen zu sein, welche die gerade der Hilbertschen und vor allem der Weylschen Darstellung eigenen Aspekte erkenntnistheoretischer und wissenschafts-

philosophischer Natur auf ihn ausübten. Wie Hilbert, dessen „Fernschüler“ er durch Frederix als Mittler geworden ist, setzte er große Erwartungen in eine Axiomatisierung der Physik und war der Überzeugung, der axiomatische Aufbau einer dem allgemeinen Relativitätsprinzip unterworfenen Lehre von Raum und Zeit werde diese höhere Entwicklungsphase der physikalischen Wissenschaft einleiten. Anscheinend teilte Friedmann auch das lebhafteste Interesse des Göttinger Zirkels um David Hilbert und Felix Klein an Konzepten für die Welt im Großen. Hilbert verstand seine unter dem Titel „Die Grundlagen der Physik“ veröffentlichte Skizze einer allgemein kovarianten Theorie des gesamten physikalischen Geschehens, welche ihren Anfang nimmt bei einem auf eine „Weltfunktion“ anzuwendenden Variationsprinzip als „Weltgesetz“ und den Versuch einschließt, die beiden Fundamentalphänomene der physikalischen Welt, Gravitation und Elektromagnetismus, theoretisch zu vereinen, offenbar als Entwurf einer „Welttheorie“. Die von ihm in der gleichnamigen Vorlesung ausgiebig verwendete „Weltsprache“ scheint eine solche Deutung zu bestätigen.⁴² Nicht nur diese Sprechweise machte sich Alexander Friedmann zu eigen, vielmehr begriff auch er die allgemeine Relativitätstheorie wohl letztendlich als einen Versuch, die Welt als Ganzes zu verstehen. Der Reiz, den die kosmologische Frage auf ihn ausübte, fügt sich organisch in diese Interessencharakteristik ein.

Die von Hermann Weyl⁴³ in *Raum Zeit Materie* durchgeführte Weiterentwicklung der einheitlichen Feldtheorie fesselte Friedmanns Aufmerksamkeit bereits beim ersten Bekanntwerden mit der allgemeinen Relativitätstheorie.⁴⁴ Da jedoch das Weylsche Konzept wie auch schon das System Hilberts an die Miesche Materietheorie Anschluß sucht, würde es nach Friedmanns Ansicht experimentell schwerlich Bestätigung finden können, und so begann er, selbst auf diesem Gebiet zu forschen.⁴⁵ Auf die mathematischen Grundlagen dieser Untersuchungen bezog sich seine Zusammenarbeit mit J. A. Schouten.⁴⁶

Eine weitere Komponente der Anziehungskraft, welche die allgemeine Relativitätstheorie und insbesondere das kosmologische Problem auf Friedmann ausübten, ergab sich aus seinem Interesse an

der Fragestellung, inwieweit und auf welchem Weg die Struktur der Welt, in der wir leben, tatsächlich experimentell und nicht nur theoretisch-spekulativ erforschbar ist.

Die in Friedmanns geistigem Charakter angelegte besondere Aufgeschlossenheit für ganz bestimmte Aspekte der allgemeinen Relativitätstheorie spiegelt sich wider in der Einschätzung der Bedeutung dieser neuen Lehre, wie sie in der Einleitung zu Frederix' und Friedmanns gemeinsamem Werk *Osnovy teorii otrossitelnosti* zum Ausdruck kommt. Weil daraus sowohl das Motivgeflecht rekonstruierbar wird, aus dem Friedmanns Forschungsergebnisse erwachsen sind, als auch der Sinnzusammenhang erkennbar wird, in den er sie selbst einordnen wollte, werden einige Absätze dieses Textes zitiert:

Für die Bedeutung des allgemeinen Relativitätsprinzips sind drei Facetten kennzeichnend: Zuvörderst erteilt diese Konzeption der *Axiomatisierung* der Physik einen kräftigen Impuls. Des weiteren bringt das allgemeine Relativitätsprinzip eine im Hinblick auf ihre Geschlossenheit geradezu wunderbare *Einheit der physikalischen Weltanschauung* hervor und schließlich eröffnet diese Theorie die Möglichkeit, mit der Unterstützung durch die Astronomie in *das Geheimnis des Makrokosmos Weltall einzudringen*.

...

Reichhaltiges experimentelles Material, die staunenswerte Beherrschung des mathematischen Apparats sowie die Entstehung einer nicht geringen Anzahl scharf- und tiefsinniger Hypothesen und Theorien haben die Physik gegen Ende des 19. und zu Beginn des 20. Jahrhunderts zu prächtiger Blüte gebracht. Nicht selten aber blieb bei dieser glanzvollen Entwicklung der Physik der logische Aspekt der Angelegenheit im Schatten stehen ... So ist es ganz natürlich, wenn der Wunsch nach logischer Überarbeitung des umfangreichen naturwissenschaftlichen Inhalts der Physik aufkommt und das Beispiel der Axiomatisierung der Mathematik auch der Physik einen Anstoß in dieser Richtung erteilt ... Noch gibt es diese Axiomatisierung nicht, aber ein Weg tut sich auf, und den Augen eines Genies, dessen Blick weiter reicht und tiefer dringt als der unsrige, enthüllt sich schon die Möglichkeit, ein System voneinander unabhängiger Axiome zu schaffen, aus dem die gesamte Physik in derselben logischen Weise hervorgehen wird wie die Geometrie oder die Arithmetik aus ihrem in sich widerspruchsfreien Axiomensystem entspringt. David Hilbert schließt den

Aufsatz „Die Grundlagen der Physik“ (Erste Mitteilung) mit den Worten: „... werden nicht nur unsere Vorstellungen über Raum, Zeit und Bewegung von Grund aus in dem von Einstein dargelegten Sinne umgestaltet, sondern ich bin auch der Überzeugung, daß durch die hier aufgestellten Grundgleichungen die intimsten bisher verborgenen Vorgänge innerhalb des Atoms Aufklärung erhalten werden und insbesondere allgemein eine Zurückführung aller physikalischen Konstanten auf mathematische Konstanten möglich sein muß – wie denn überhaupt damit die Möglichkeit naherückt, *daß aus der Physik im Prinzip eine Wissenschaft von der Art der Geometrie werde*: gewiß der herrlichste Ruhm der axiomatischen Methode ...“

...

Die zweite Facette, in der die Bedeutung des allgemeinen Relativitätsprinzips aufscheint, besteht darin, daß es möglich wird, eine einheitliche physikalische Weltanschauung zu begründen. Die gesamte Entwicklungsgeschichte der Physik der letzten Jahrzehnte ist vom Streben nach derartiger Einheit gekennzeichnet. Daß in der Physik in letzter Zeit zahlreiche Hypothesen und Theorien entstanden sind und noch entstehen, haben wir bereits angesprochen; es ist unumgänglich, diese Theorien zu vereinen und die Möglichkeit zu schaffen, sie auf einen Blick, von einem einzigen Standpunkt aus zu erfassen. An dieses Ziel führt das Relativitätsprinzip mit schnellen, bisweilen ungleichmäßigen, aber durchweg genialen Schritten heran. Indem er die Physik mit der Geometrie verknüpfte, schuf Einstein schon die Grundlage zur Erklärung der geheimnisvollen universellen Gravitation. Weyl schreitet nun auf diesem Wege weiter voran, entwickelt neue Räume und verbindet auf diese Weise Geometrie, Schwerkraft und Materie miteinander. Gemäß seiner Konzeption ist all das, was als Gravitation oder als elektromagnetisches Phänomen in Erscheinung tritt, nur der Wiederhall gewisser Merkmale der vierdimensionalen Welt. Obwohl die Interpretation des Weylschen Konzepts noch nicht einmal in dem Maße als experimentell bestätigt gelten darf wie die Einsteinsche Theorie, nötigt uns doch die Großartigkeit des Gedankengebäudes besonderen Respekt ab.

Wie die Axiomatisierung der Physik hauptsächlich in das Gebiet des logischen Denkens fällt, die Einheit der physikalischen Weltanschauung insbesondere ein Anliegen des Physikphilosophen ist, so wird die dritte vom Relativitätsprinzip angeschnittene Facette vor allem den experimentell arbeitenden Physiker angehen und interessieren müssen. Das Relativitätsprinzip läßt es möglich werden, eine Reihe von Schluß-