

Relativität in der Schwebel:  
Die Rolle von Gustav Mie

Gunter Kohl

Mit einem Vorwort von David E. Rowe



On the Early Reception of Einstein's General Theory of Relativity  
Introductory Remarks on the Studies  
by Gunter Kohl, Stefan Röhle and Lars Rosenberger

David E. Rowe

The Einstein centennial celebrations in 1979 gave scholars from several different disciplines the opportunity to reflect on the man, his achievements, and his influence on twentieth-century thought.<sup>1</sup> Few who took part in the events of that year, however, were likely to have imagined that during the decades following Einstein studies would surge forward at an unprecedented pace. Since 1979 a wealth of new source material has been brought to light, most notably in the first eight volumes of the *Collected Papers of Albert Einstein (CPAE)*. Alongside these volumes several historical studies on the general theory of relativity have also appeared, and GRT has been the subject of numerous books, journal articles, and papers published in the volumes of *Einstein Studies*. The Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte has played a major role in promoting historical research on Einstein and relativity theory. Many leading experts have participated in on-going projects sponsored by the MPI, a major focus of which has been Einstein's long, excruciating journey leading up to his presentation of a generally covariant theory of gravitation in 1916.<sup>2</sup> In the context of this principal endeavor, the MPI-Preprint Series has presented several important studies related to general relativity.<sup>3</sup>

Einstein's own contributions to general relativity from the period 1918 to 1921 are now easily accessible through the recently published seventh volume of the *CPAE*. This opens with his second, definitive paper on gravitational waves, and ends with the published version of his Princeton lectures from May 1921. In contrast with Volume 6, which contains Einstein's foundational papers on general relativity from 1914 to 1917, the writings in Volume 7 reveal that by 1918 he was no longer working in virtual isolation, a circumstance he had often complained about up until the very end of 1915. In the course of just two years this situation had changed dramatically. Indeed, by 1918 most of Einstein's contributions to general relativity were written, at least in part, as responses to the work of others, including David Hilbert, H. A. Lorentz, Hermann Weyl, Erwin Schrödinger, Erich Kretschmann, Tullio Levi-Civita, and Felix Klein. Both the writings in volume 7 as well as Einstein's correspondence from this period reflect a major shift in the early reception of general relativity. Thus, well before its public triumph in November 1919 as a result of the British

---

<sup>1</sup> The most ambitious of these was the Jerusalem Einstein Centennial Symposium, which led to the collection of essays *Albert Einstein, Historical and Cultural Perspectives*, ed. Gerald Holton and Yehuda Elkana, Princeton: Princeton University Press, 1982.

<sup>2</sup> The results will appear in Jürgen Renn, Tilman Sauer, Michel Janssen, John Norton, John Stachel, *The Genesis of General Relativity: Documents and Interpretation*. Vol. 1. *General Relativity in the Making: Einstein's Zurich Notebook*. Dordrecht: Kluwer. Earlier studies by those in the Berlin group include John Norton, "How Einstein Found his Field Equations, 1912–1915," *Historical Studies in the Physical Sciences* 14 (1984): 253–316; reprinted in Don Howard and John Stachel, eds. *Einstein and the History of General Relativity*, *Einstein Studies*, Vol. 1 (Boston: Birkhäuser, 1989), pp. 101–159; John Stachel, "Einstein's Search for General Covariance, 1912–1915," in *ES*, Vol. 1, pp. 62–100; Michel Janssen, "Rotation as the Nemesis of Einstein's Entwurf Theory," in Hubert Goenner, et al., eds., *The Expanding Worlds of General Relativity, ES*, Vol. 7 (Boston: Birkhäuser, 1999), pp. 127–157.

<sup>3</sup> Among these MPI-preprints, five are particularly relevant for the three studies by Kohl, Rosenberger, and Röhle: Jürgen Renn, *The Third Way to General Relativity*, no. 9; Leo Corry, *Hilbert and Physics (1900-1915)*, no. 43; Jürgen Renn and Tilman Sauer, *Heuristics and Mathematical Representation in Einstein's Search for a Gravitational Field Equation*, no. 62; Jürgen Renn and John Stachel, *Hilbert's Foundation of Physics: From a Theory of Everything to a Constituent of General Relativity*, no. 118; Catherine Goldstein and Jim Ritter, *The Varieties of Unity: Sounding Unified Theories, 1920-1930*, no. 149.

eclipse expeditions, GRT had begun to attract the attention of leading theoretical physicists, astronomers, and mathematicians.

The trio of studies by Gunter Kohl, Lars Rosenberger, and Stefan Röhle on the early reception and development of general relativity was undertaken as part of a research project at Mainz University. These investigations offer several new perspectives on this complex process by exploring Einstein's interactions with three key contributors and critics, namely Gustav Mie, Hans Thirring, and Willem de Sitter. Although all three were deeply influenced by Einstein's new approach to gravitation, their diverse, sometimes ambivalent responses to his foundational assumptions reveal some of the many shades of divergent interpretation found even among proponents of a generalized theory of relativity. Drawing on the wealth of new sources now available, the authors show how these three friendly interlocutors struggled with major problems at the interface between the physical, mathematical, and epistemological components of Einstein's theory. Some of these critical difficulties were inherent in Einstein's earliest attempts to frame a generally covariant theory of gravitation; others emerged only later, as general relativity continued to be developed, revised, and applied to astronomy and cosmology. Through their interactions with Einstein, Mie, Thirring, and de Sitter helped elucidate some of GRT's central conceptual and technical problems, and it is this common thread in the studies by Kohl, Rosenberger, and Röhle that I would like to emphasize here.

-1-

Einstein's fascination with problems of relative motion and their proper interpretation in physics can be traced back to his early interest in the foundations of Lorentzian electrodynamics. One need only recall, for example, the opening discussion in "Zur Elektrodynamik bewegter Körper," where he refers to the electromotive force produced in a coil that moves relative to a bar magnet. In 1905 this phenomenon had two separate interpretations, depending on whether the coil or the magnet was regarded as stationary. Einstein regarded this as an obvious epistemological weakness in the conventional approach to Lorentz's theory.<sup>4</sup> To circumvent similar anomalies connected with an ether-based electromagnetic theory, he proposed the idea of extending the mechanical principle of relativity for inertial frames to all of physics, in particular electrodynamics. This meant replacing the classical Galilean transformations, which retained their significance for velocities much smaller than the speed of light, by the group of Lorentz transformations in which the time variable is no longer independent of the three spatial variables. With one bold stroke, Einstein dispensed with the notion of an ether at rest in absolute space. According to his special theory of relativity, all inertial frames are physically indistinguishable, making absolute motion impossible to detect.

Yet soon after 1905, while pondering the implications of relativity for gravitational phenomena, Einstein reached the startling conclusion that even this radically extended principle of relativity was too restrictive. This realization came in 1907 with the equivalence principle, which he later called the happiest idea of his life. Born of an innocent-looking thought experiment involving free fall in empty space, this principle henceforth served as the cornerstone for all of Einstein's speculations on gravitation, providing the bridge that enabled him to pass from the kinematics of uniformly accelerated frames of motion to their associated homogeneous, static gravitational fields. For Einstein, the equivalence principle carried an even wider implication, namely that gravitational and inertial effects must be treated as indissolubly united. He next focused on rotational motion as the key remaining problem that had to be resolved in order to unite gravitational and inertial forces while generalizing the

---

<sup>4</sup> In *Electrodynamics from Ampère to Einstein* (Oxford University Press, 2000), Olivier Darrigol has shown that while several physicists were grappling with many of the same issues in electrodynamics, Einstein's work was primarily guided by a deep interest in the epistemological foundations of Lorentz's theory.

principle of relativity. Considerations involving a rotating disc also made Einstein gradually aware of the limitations of rigid body mechanics, as adapted to special relativity by Max Born and Gustav Herglotz. Following Paul Ehrenfest's lead, he realized that the contraction of measuring rods placed along the circumference of such a rigid disk led to a non-Euclidean geometry in the disk's frame of reference.<sup>5</sup> This meant that any rotating frame in gravity-free Minkowski space produced effects on the space-time structure as reflected in its fundamental quadratic differential form, which Einstein later called the metric tensor. The problem of accommodating rotational motion thus led Einstein to a key insight that opened the way to his first generalized theory of relativity, the so-called *Entwurf* theory that he and Marcel Grossmann sketched in 1913.

Einstein's collaboration with Grossmann was the first of his many joint ventures with mathematicians. Indeed, after 1913 he seldom worked on general relativity and/or unified field theories without mathematical assistance. In the case of the *Entwurf* theory, Einstein and Grossmann adopted a clear-cut division of labor, with Einstein presenting the physical arguments and Grossmann the mathematical apparatus in their two-part article. In their study of Einstein's Zurich Notebook, Jürgen Renn and Tilman Sauer have emphasized how Einstein designed his original theory of gravitation with a number of built-in features which Renn and Sauer analyze in terms of key heuristic principles that propelled his quest forward.<sup>6</sup> Einstein's approach thus differed strikingly from the one later taken by the Göttingen mathematician David Hilbert, who tried to place GRT in a larger field-theoretic setting right from the beginning, while claiming that from an axiomatic standpoint many of its features were pre-determined.<sup>7</sup> Einstein's inspiration for general relativity, which he conceived as a *Prinziptheorie*, was by contrast a novel admixture of physical and formal heuristics.<sup>8</sup> Initially, his physical *Ansätze*--the equivalence principle, energy-momentum conservation, and relativity of inertia--were closely tied to the formal requirement of general covariance, which he interpreted as the precise generalization of the principle of relativity. Yet, as the studies by Kohl, Rosenberger, and Röhle illustrate, Einstein clung tenaciously to his physical precepts while at the same time showing only occasional concern with regard to the oft-changing and problematic status of general covariance within his theory.

If the problem of rotation acted as a catalyst for Einstein's insight that non-inertial motion was linked with the geometry of space-time, he soon leapt to the conclusion that *all* force-free motion should be regarded as relative to a space-time structure conditioned by the presence of matter. Inertial motion, as postulated within Newton's mechanics and generalized by Einstein's principle of special relativity to all of physics, clearly pertained only to those cases where gravitation was either absent or could be neglected. The presence of matter, on the other hand, should lead to a local deformation of the space-time curvature, making almost any kind of motion possible, at least in principle. Since gravitation induces accelerative motion, Einstein thought of accelerating bodies as test particles that register the effects of a

---

<sup>5</sup> See John Stachel, "Einstein and the Rigidly Rotating Disk," in *General Relativity and Gravitation: One Hundred Years after the Birth of Albert Einstein*, vol. 1, pp. 1–15. Alan Held, ed. New York: Plenum, 1980. Reprinted in Don Howard and John Stachel, eds., *Einstein and the History of General Relativity*. Boston: Birkhäuser, 1989, pp. 48–62.

<sup>6</sup> Jürgen Renn and Tilman Sauer, "Heuristics and Mathematical Representation in Einstein's Search for a Gravitational Field Equation," in Hubert Goenner, et al, eds. *The Expanding Worlds of General Relativity*. Boston: Birkhäuser, 1999; see also Jürgen Renn and Tilman Sauer, „Einstein's Züricher Notizbuch. Die Entdeckung der Feldgleichungen der Gravitation im Jahre 1912.“ *Physikalische Blätter* 52 (1996): 865–872.

<sup>7</sup> As Renn and Stachel have shown, however, Hilbert's original strategic objectives were largely abandoned in 1916 as he became familiar with the underpinnings of Einstein's revised theory (see Renn and Stachel, *Hilbert's Foundation of Physics: From a Theory of Everything to a Constituent of General Relativity*, MPI preprint no. 118). See also, David E. Rowe, "Einstein meets Hilbert: At the Crossroads of Physics and Mathematics," *Physics in Perspective* 3(2001): 379-424.

<sup>8</sup> Einstein described what he meant by a *Prinziptheorie* in "Was ist die Relativitätstheorie?" Doc. 24, *CPAE*, vol. 7.

gravitational field. If the gravito-inertial properties of matter are indeed conditioned dynamically, as he believed, then all force-free motion could be regarded as in some sense relative. It would then be natural to assume that a mass point would move along a geodesic in a four-dimensional space-time manifold. Still, generalizing the principle of relativity so as to allow for all the myriad types of motion possible clearly posed a problem of staggering proportions.

To what extent such a geometrized physical model entered Einstein's mind in 1912-1913 remains unclear, but he presumably posed considerations such as these to his friend Marcel Grossmann. The latter's main claim to fame, of course, stems from having recognized that Ricci's absolute differential calculus was ideally suited to the task at hand. Grossmann recognized that the mathematical operations of the Ricci calculus generalized those of vector analysis while preserving the character of generally covariant expressions, dubbed tensors by Einstein and Grossmann. These entities transform properly under arbitrary coordinate transformations, and hence retain their underlying form in any coordinate system. For Einstein and Grossmann, this suggested the possibility of pursuing a new field-theoretic approach to gravitation and inertia by generalizing the formalism that Hermann Minkowski, Arnold Sommerfeld, and Max Laue had developed for special relativity.

Although the framework of SRT retained its validity for electromagnetism, Einstein believed it could not be applied directly to account for gravitational phenomena. Special relativity left the *a priori* Euclidean character of space intact, and this Einstein found deeply dissatisfying epistemologically. Thus, when Gunnar Nordström succeeded in setting forth a Lorentz-covariant scalar theory of gravitation that was both simpler and more natural than the *Entwurf* theory, Einstein privately dismissed it, noting that it was "built on the aprioristic Euclidean four-dimensional space, the belief in which, I feel, is akin to superstition."<sup>9</sup> He was convinced that Nordström's theory skirted all the deeper problems concerning space, time, and matter.<sup>10</sup> To tackle these, Einstein proposed to generalize relativity theory in such a way that Newtonian gravitation and special relativity could be derived as limiting cases. At the same time, gravitational forces were to have precisely the same status as the so-called "fictional" forces that arise in non-inertial frames: both were to be seen against the local space-time structure as registered by the fundamental metric tensor. Having banished the absolute ether from Lorentz's theory, Einstein now prepared the way for a new kind of ether physics based on the gravito-inertial field.<sup>11</sup>

-2-

It should be emphasized that prior to 1919, relatively few physicists were prepared to make this bold conceptual leap with Einstein, and even some who recognized the merits of this wedding of gravity and inertia argued against the broad framework Einstein proposed for his theory. One such figure was Gustav Mie. As Gunter Kohl's study shows, Mie voiced such misgivings early on and often. In the discussions that followed Einstein's lecture on recent gravitational theories at the Vienna meeting of German Natural Scientists and Physicians held on 23 September 1913, Mie presented a classic objection to the general principle of relativity:

Man denke sich, man fahre in einem Eisenbahnwagen, der gegen die Außenwelt abgeschlossen ist. Man wird in den Wagen gerüttelt und

---

<sup>9</sup> Albert Einstein to Erwin Freundlich, 20 January 1914, in Martin J. Klein, et al., eds., *CPAE*, Vol. 5: *The Swiss Years: Correspondence, 1902-1914* (Princeton: Princeton University Press, 1993), p. 594.

<sup>10</sup> In fact, Einstein's criticisms led Nordström to modify his theory. See John Norton, "Einstein, Nordström, and the Early Demise of Lorentz Covariant Scalar Gravitation Theories," *Archive for History of Exact Sciences* 45 (1992-93): 17-94.

<sup>11</sup> After dropping hints of this notion of an ether, Einstein spelled out his speculations in his Leiden Inaugural lecture, "Aether und Relativitätstheorie," delivered in October 1920. Lorentz had urged him to address this theme on that occasion (see Doc. 38, vol. 7, *CPAE* and the accompanying notes).

geschüttelt, und diese Kraftwirkungen, die man an seinem eigenen Körper spürt, pflegt man zu erklären als Trägheitswirkungen, infolge der unregelmäßigen Schwankungen des Wagens. Das allgemeine Relativitätsprinzip in der jetzt zu besprechenden Auffassung würde nun behaupten, dass es möglich sei, ein System gravitierender Massen anzunehmen, das unregelmäßigen Bewegungen um den als ruhend bedachten Eisenbahnwagen herum ausführt und das so auf unsern Körper dieselben Wirkungen hervorruft, die wir für Trägheitswirkungen halten. Eine derartige Fiktion kann mathematisch gelegentlich ganz praktisch sein, wie man z. B. zur Berechnung von Ebbe und Flut fingierte Planeten annimmt, um die sehr schwierig zu berechnenden Trägheitswirkungen dadurch zu ersetzen, aber keinem Physiker wird es einfallen, diese fingierten Planeten für wirklichen existierende Körper zu halten. Ebenso wenig wird man die Trägheitswirkungen in dem Eisenbahnwagen physikalisch als Wirkungen gravitierender Massen deuten können, das würde zu Widersprüchen mit den Prinzipien der physikalischen Forschung überhaupt führen. Ich glaube also, dass die hier besprochene Auffassung des verallgemeinerten Relativitätsprinzips keinen physikalisch Sinn hat.<sup>12</sup>

As Kohl points out, Einstein was apparently unable to refute this criticism convincingly. In a footnote added to the protocol of the discussions, Einstein merely remarked that his theory did not fulfill the principle of relativity in this most general sense. On the contrary, he asserted that the conservation laws lead to a far-reaching specialization of the allowable reference systems, as he had indicated already in his lecture.<sup>13</sup> Such remarks reveal how vulnerable the *Entwurf* theory was to Mie's attack on the principle of general covariance.

Among the various criticisms Mie later leveled at the Einstein-Grossmann theory, the most serious involved its limited covariance about which Mie wrote: "Die Verallgemeinerung des Relativitätsprinzips, die in der Einsteinschen Arbeit erreicht worden ist, bezieht sich auf lineare Transformationen, hat also mit beschleunigten Bewegungen gar nichts zu tun."<sup>14</sup> Although this claim was clearly exaggerated, Mie nevertheless put his finger on a key problem: Einstein's attempt to generalize relativity by extending the equivalence principle to arbitrary motions seemed to raise insuperable difficulties. Indeed, many subsequent observers emphasized the striking differences between the case of uniform acceleration, as treated by the equivalence principle, and more complicated motions, beginning with the case of uniform rotation. Mie's thought experiment with the bumpy train-car ride thus cut to the heart of what would long remain a major point of contention within the German physics community. Indeed, the passage quoted above bears a striking resemblance to the train-crash query Philipp Lenard later addressed to Einstein in their infamous debate at the 1920 Bad Nauheim *Naturforscher* meeting.<sup>15</sup> Gustav Mie also spoke on that occasion, and Lenard later wrote that he found Mie's remarks the only novel contributions to the general discussion.<sup>16</sup> As an outspoken anti-relativist, Lenard subsequently waged a losing battle against the "Einstein clique" that took on ugly political overtones. Yet even Hermann Weyl, a strong pro-relativist who wrote an extensive commentary on the Bad Nauheim debates, was forced to conclude that Einstein's response to

<sup>12</sup> Doc. 18, *CPAE*, vol. 4, p. 507.

<sup>13</sup> *Ibid.*; see Kohl, section 4.2.2

<sup>14</sup> Gustav Mie, "Bemerkungen zu der Einsteinschen Gravitationstheorie. II," *Physikalische Zeitschrift* 15(1914): 169-176, p. 176.

<sup>15</sup> See Doc. 46, *CPAE*, vol. 7 and the editorial note "Einstein's Encounters with German Anti-Relativists" preceding Doc. 14.

<sup>16</sup> Philipp Lenard, *Über Relativitätsprinzip, Äther, Gravitation.*, Leipzig: Hirzel, 1921, p. 39.

Lenard's main point was inadequate.<sup>17</sup> In chapter 4 of his study, Gunter Kohl traces a whole series of ongoing debates between Einstein and Mie over related issues.

On the positive side, Mie's criticisms brought the issue of preferred coordinate systems into the open. Following his encounter with Einstein in Vienna, Mie noted that a mathematical proof of the impossibility of finding generally covariant solutions of the gravitational field equations would be of interest. This may have given Einstein further inducement to publish his argument in support of this claim, which he had announced in a footnote appended to his Vienna lecture.<sup>18</sup> What Einstein meant by this was spelled out in his reply to Mie, which contained his first sketch of the ill-famed hole argument. This purported to show that the metric tensor  $g_{\mu\nu}$  cannot be fully and uniquely determined by the matter tensor  $T_{\mu\nu}$  if certain simple coordinate transformations are allowed, namely ones that remain fixed except possibly for points where  $T_{\mu\nu}$  vanish, as for example in a "hole" of the physical system. In this context, the demand that  $T_{\mu\nu}$  should completely determine  $g_{\mu\nu}$  was, for Einstein, apparently a formal mathematical requirement that physicists typically placed on any system of differential equations. Viewing the tensor  $T_{\mu\nu}$  as given, Einstein insisted that this data alone sufficed to determine the space-time structure, which meant that the field equations must have a unique solution for  $g_{\mu\nu}$ . It appears that Einstein only began to doubt the soundness of this argument after he had actually produced generally covariant field equations in November 1915.<sup>19</sup>

Ironically, Einstein later reinterpreted the demand that  $T_{\mu\nu}$  fully determines  $g_{\mu\nu}$  in a far more physical way, dubbing this notion "Mach's principle." This amounted to serving old wine in new bottles that could encapsulate the idea that the global properties of matter determined local inertial properties.<sup>20</sup> But Einstein had another good reason to reformulate the foundations of general relativity. His new twist came in 1918 in the wake of Kretschmann's claim that Einstein's principle of general covariance was physically vacuous.<sup>21</sup> Einstein responded by (temporarily) forsaking the doctrine that he had hitherto regarded as distinguishing general relativity from other physical theories, namely that the fundamental equations of GRT remain valid for arbitrary reference frames in any coordinate system whatsoever.<sup>22</sup> In 1918 he dropped this notion in order to make his Machian assumptions more precise. At the same time he conceded Kretschmann's point that general covariance was a purely formal principle, arguing that it was nevertheless of great heuristic value for finding gravitational field equations with the desired properties. In a final twirling maneuver, Einstein reformulated his principle of general relativity to say that the theory was solely concerned with space-time coincidences. No doubt this new principle made little impression on most of Einstein's contemporaries, and yet today we know that it had considerable significance for Einstein himself. Indeed, it was precisely this consideration that finally enabled him in late

---

<sup>17</sup> Hermann Weyl, "Die Relativitätstheorie auf der Naturforscherversammlung," *Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung* 31 (1922): 51-63, p. 61. Weyl promoted his notion of a guiding field (*Führungsfeld*), understood as the physical realization of an affine connection, as the key to understanding the relationship between gravity and inertia.

<sup>18</sup> Doc. 17, *CPAE*, vol. 4, p. 495.

<sup>19</sup> See John Norton, "How Einstein Found his Field Equations, 1912-1915," and John Stachel, "Einstein's Search for General Covariance, 1912-1915" (ref. 2).

<sup>20</sup> For a provocative modern approach to a Machian program, see Ignazio Ciufolini and John Archibald Wheeler, *Gravitation and Inertia*, (Princeton: Princeton University Press, 1995).

<sup>21</sup> Erich Kretschmann, "Über den physikalischen Sinn der Relativitätspostulate. A. Einsteins neue und seine ursprüngliche Relativitätstheorie," *Annalen der Physik* 53 (1917): 575-614.

<sup>22</sup> Albert Einstein, "Prinzipielles zur allgemeinen Relativitätstheorie," *Annalen der Physik* 55 (1918): 241-244, Doc. 4, *CPAE*, vol. 7.



1915 to recognize the vacuous nature of his “unlucky” *Gedankenexperiment* concerning a hole in physical space-time.<sup>23</sup>

-3-

If Einstein wavered over the principle of general relativity, the same cannot be said with regard to the key idea he borrowed from Ernst Mach: the relativity of inertia. Lars Rosenberger’s study delves into the long prehistory of efforts to understand the origins of inertia before proceeding to analyze Hans Thirring’s work on the problem of rotation in GRT. This problem was intimately tied to the larger one of accounting for the inertial properties of matter, an issue that surfaced over and over again as Einstein revised the foundations of his theory from 1912 to 1918. Throughout these years, he continually emphasized the theoretical importance of a gravitational theory that could incorporate centrifugal effects, thereby vindicating Mach’s ideas about the relativity of inertia. Nevertheless, he left it for Thirring to pursue the problem of rotation in the context of his mature, *post-Entwurf* theory.

As is well known, Einstein’s reading of Mach provided one of the major *Leitideen* that guided his quest to find a field theory of gravitation. Already back in September 1913, when he spoke in Vienna, Einstein gave a clear statement of the Machian inspiration that guided his quest to generalize the principle of relativity:

Von Bewegung, also auch Beschleunigung eines Körpers *A* an sich zu reden, hat keinen Sinn. Man kann nur von Bewegung bzw. Beschleunigung eines Körpers *A* relativ zu anderen Körpern *B*, *C* usw. sprechen. Was in kinematischer Beziehung von der Beschleunigung gilt, das dürfte auch von dem Trägheitswiderstande gelten, den die Körper einer Beschleunigung entgegensetzen; es ist a priori zu erwarten, wenn auch nicht gerade notwendig, dass der Trägheitswiderstand nichts anderes sei als ein Widerstand gegen Relativbeschleunigung des betrachteten Körpers *A* gegenüber der Gesamtheit aller übrigen Körper *B*, *C* usw. Es ist wohlbekannt, dass E. Mach in seiner Geschichte der Mechanik diesen Standpunkt zuerst mit aller Schärfe und Klarheit vertreten hat . . . .<sup>24</sup>

In his famous critique of Newton’s notion of absolute space, Mach appealed to the influence of distant masses as the sources responsible for determining local inertial properties. Einstein recognized that this was not the only logically tenable standpoint, but he also felt that Mach’s position had the merit of accounting for inertial properties otherwise left unexplained. In Newtonian mechanics, physicists introduced special coordinate systems with the property that force-free motion takes place uniformly along straight lines. As Einstein emphasized in Vienna, this amounted to postulating the existence of inertial frames without any reference to the physical phenomena that distinguish these from any other frames. Taking up this Machian challenge, he henceforth tried to couple gravitational with inertial effects as produced by accelerating frames.

Einstein’s initial, quite natural working hypothesis suggested that a uniformly rotating body induced gravitational field effects analogous to the centrifugal and Coriolis forces familiar from classical mechanics. If rotational motion were relative in the sense of Einstein’s equivalence principle – where a uniformly accelerated inertial frame is indistinguishable from

---

<sup>23</sup> See John Norton, “How Einstein Found his Field Equations, 1912–1915,” and John Stachel, “Einstein’s Search for General Covariance, 1912–1915” (ref. 2).

<sup>24</sup> Doc. 17, *CPAE*, vol. 4, p. 498.

a homogeneous gravitational field -- then a rotating frame should be physically equivalent to the same frame taken at rest while the ambient space rotated about it in the opposite direction. Were this so, then the analogy with his original formulation of the equivalence principle would have been complete. Yet Einstein must have realized the limitations of such an argument early on. In a letter to Ehrenfest from June 1912, he pointed out that the equivalence principle could only hold locally, a conclusion he reached after pondering various difficulties associated with accelerating reference systems.<sup>25</sup> One year later, shortly after the debut performance of the Einstein-Grossmann theory, Einstein sent a triumphant letter to Ernst Mach: “es ergibt sich mit Notwendigkeit, dass die Trägheit in einer Art Wechselwirkung der Körper ihren Ursprung hat, ganz im Sinne ihrer Überlegungen zum Newton’schen Eimerversuch.”<sup>26</sup> Yet Einstein’s efforts to realize this bold program bore no immediate fruit (see Rosenberger’s analysis, pp. 40-48).

Michel Janssen’s research on Einstein’s struggles with the problem of rotation during the period 1913-1915 have thrown new light on this puzzling chapter in the early history of general relativity.<sup>27</sup> During 1913 Einstein briefly collaborated with his friend Michele Besso in a futile attempt to account for the perihelion of Mercury using the *Entwurf* theory field equations. According to Einstein’s own testimony, his faith in this theory was badly shaken when he realized in September 1915 that the metric induced by a rotating coordinate system was not a solution to the Einstein-Grossmann field equations. Janssen, however, has shown that back in 1913 Einstein probably already knew that the *Entwurf* theory equations were incompatible with rotational motions. And although he and Besso were fully aware of the centrality of this problem, they apparently failed to draw the obvious conclusion: namely that the Einstein-Grossmann theory was useless even in the simple case of rotating frames.

Interestingly enough, even after he had found generally covariant field equations, Einstein chose not to take up the problem of rotation again. Instead, he encouraged young Hans Thirring to work through the calculations on a key problem that long guided Einstein’s efforts to understand the relationship between gravitation and inertia. Lars Rosenberger’s study offers the first detailed analysis of Thirring’s results on what has come to be called frame dragging. Drawing on techniques developed by Einstein in 1916 for finding approximate solutions of the gravitational field equations, Thirring one year later determined the metric for a rotating hollow shell, showing that this spinning mass exerted small effects on a test particle in the shell’s interior analogous to the centrifugal and Coriolis forces of classical mechanics.

Rosenberger points out that initially both Einstein and Thirring thought the general covariance of the gravitational field equations and equations of motion sufficed for showing that the problem of rotation satisfied a strong global form of the principle of general relativity. According to this, one could regard the field inside a rotating shell as equivalent to the one that would arise were the shell at rest and the universe in rotation with the opposite angular velocity about it (see the quotations from Thirring’s letter to Einstein as well as from Einstein’s letter to Besso in sections 3.3 and 3.1.2, respectively). This approach to the relativity of rotational motion, however, overlooks the asymmetry that arises with regard to the boundary conditions at spatial infinity. After recognizing this difficulty, Thirring found a way to solve the field equations for a uniformly rotating hollow shell by adopting the hypothesis that the metric outside the shell gradually becomes flat. So understood, his work marked a quiet step in the process that gradually led to a decoupling of the principle of

---

<sup>25</sup> Doc. 409, *CPAE*, vol. 5, p. 486.

<sup>26</sup> Doc. 448, *CPAE*, vol. 5, p. 532. See Rosenberger, p. 39.

<sup>27</sup> Michel Janssen, “Rotation as the Nemesis of Einstein’s *Entwurf* Theory”; Michel Janssen, “What did Einstein Know and When did he Know it? A Besso Memo Dated August 1913,” in Jürgen Renn, Tilman Sauer, Michel Janssen, John Norton, John Stachel, *The Genesis of General Relativity: Documents and Interpretation*. Vol. 1. *General relativity in the Making: Einstein’s Zurich Notebook*. Dordrecht: Kluwer, to appear..

general relativity from the origins of inertia. In the final chapter of his 1921 Princeton lectures, Einstein underscored the importance of Thirring's results, which confirmed that in GRT the inertial properties of matter depend on mutual interactions with surrounding matter, even if these were far too small to be measured in practice.<sup>28</sup> Still, Hermann Weyl later emphasized that Thirring's results actually predict asymmetrical effects if the frame of the test particle rotates rather than that of the hollow sphere. For Weyl, this demonstrated that rotational motion is *not* relative after all!<sup>29</sup> Well before this, Gustav Mie adopted a similar perspective (see Kohl's discussion of rotation in section 4.3.4).

-4-

Whereas Thirring's work was undertaken to support Einstein's Machian program, the latter encountered early resistance from another leading relativist, Leiden's Willem de Sitter. As Stefan Röhle describes, Leiden quickly emerged as the leading center for research on general relativity during the period 1915-1920. A major factor behind this lively activity stemmed from Einstein's personal friendships with H. A. Lorentz and especially Paul Ehrenfest, who inspired a large number of young physicists. Within the larger Leiden scientific community, de Sitter played an especially prominent part in pursuing the empirical predictions of GRT. As an astronomer with a strong empiricist bent, he showed relatively little interest in the more abstruse theoretical issues that had been of such decisive importance for Einstein from the beginning. In contrast with Hermann Weyl, Arthur Eddington, and several other leading relativists who were attracted to Einstein's more daring physical ideas, de Sitter took a decidedly skeptical view of these. As he freely admitted to Einstein: "unsere 'Glaubensdifferenz' kommt darauf an, daß Sie einen bestimmten Glauben haben, und ich Skeptiker bin."<sup>30</sup> Thus, for de Sitter, Mach's principle was a purely speculative idea that could never be tested, and for this reason he regarded Einstein's claim that distant masses accounted for the inertial properties of matter as a dogma devoid of any scientific value.

Although de Sitter was one of the leading astronomers of his time, today he is mainly remembered for an important early contribution to relativistic cosmology, the famous Model B he produced as an alternative to Einstein's Model A, the cylindrical universe. This terminology stems from de Sitter's first paper from 1917 in which he referred to these as "System A" and "System B" (he called Minkowski space "System C"). As Röhle points out in section 3.4, these static models played a central role in the cosmological speculations of the 1920s. After 1930, when cosmologists like Lemaître and Eddington became convinced of the need for dynamical models corresponding to an expanding universe, those of Einstein and de Sitter were no longer taken very seriously, although they continued to serve as familiar special cases.

Einstein's earliest efforts to apply general relativity to cosmological problems were strongly rooted in his Machian agenda, which claimed that the global distribution of matter in the universe determined the inertial properties of matter in local inertial frames. His first attempts to realize this objective, however, led to difficulties with the boundary conditions at spatial infinity. Einstein discussed these problems with de Sitter during a visit to Leiden in the summer of 1916. The latter's critical reaction to the notion of distant masses can be seen from a letter he wrote to Einstein the following November: "man gewinnt damit eine 'Erklärung' des Ursprungs der Trägheit, die doch keine Erklärung ist, denn es ist nicht eine Erklärung aus bekannten, oder kontrollierbaren Tatsachen, sondern aus ad hoc gefundenen Massen."<sup>31</sup>

---

<sup>28</sup> See Doc. 71, *CPAE*, vol. 7, pp. 563-567.

<sup>29</sup> Hermann Weyl, "Massenträgheit und Kosmos. Ein Dialog," *Die Naturwissenschaften* 12 (1924): 197-204, pp. 199-200.

<sup>30</sup> Doc. 327, *CPAE*, vol. 8.

<sup>31</sup> Doc. 327, *CPAE*, vol. 8.

Whether or not de Sitter's skepticism had any influence on Einstein's subsequent refinement of Mach's principle, the astronomer's critique of his handling of the metric at spatial infinity did lead Einstein to drop his original approach (see Rosenberger's section 4.1.2 for more on this). Soon thereafter, Einstein introduced his cosmological constant in order to obtain a static model of a closed, bounded universe, thereby circumventing the problem of boundary conditions at infinity altogether. Thus, right from its infancy, de Sitter influenced the course of research in relativistic cosmology.

Stefan Röhle carefully examines the context of the ensuing controversy between Einstein and de Sitter with respect to their two famous cosmological models. This theme has been addressed many times in the historical literature, including a detailed account by Pierre Kerszberg.<sup>32</sup> Röhle's study, however, takes advantage of the new source material available in *CPAE*, volume 8, including Michel Janssen's editorial note, which revealed some of the larger contours of the Einstein – de Sitter debate for the first time. Janssen's commentaries in volume 8 show how the anomalous properties exhibited by DeSitter's matterless cosmological model sparked a fascinating series of exchanges involving not only the two principals but two prominent mathematicians as well: Hermann Weyl and Felix Klein. This four-cornered debate had a number of surprising twists and turns, some of which appear in an amusing light for those familiar with the subtleties of space-time singularities.<sup>33</sup> Röhle discusses the main issues involved in section 4.8. There he surveys the landscape of contemporary cosmological discourse, adding reflections on the goals, shared assumptions, and diverging opinions of some of the leading figures of the era. He emphasizes that de Sitter regarded the three systems A, B, and C as true cosmological models in the modern sense, a viewpoint by no means commonplace back in 1917-18. Interestingly enough, de Sitter's skepticism with regard to Einstein's cosmological constant led him to prefer the flat space-time structure of model C over his own model B.

In Chapter 5, Röhle takes up the wider debate with the contributions of Klein and Weyl. For Felix Klein, who took an agnostic position on most cosmological questions, the key issue was whether de Sitter's world contained intrinsic singularities, as Einstein claimed. From a purely mathematical point of view, Klein argued that the answer to this question was that it did not. To make this point, he repackaged de Sitter's world in a projective setting and endowed it with a Caylean metric, a technique he himself made famous in his early work on projective non-Euclidean geometry from 1871.<sup>34</sup> In this new cosmological context Klein's approach had the advantage that one could easily grasp the group action on the manifold in the spirit of his "Erlangen Program." By so doing, Klein showed that the singularities arising in a particular coordinate system have no geometric significance, since one can easily remove these by utilizing an appropriate coordinate transformation.

Presumably Einstein had great difficulty understanding the technical parts of Klein's argument (see Röhle's section 5.2). Even the mathematicians of Einstein's generation were rarely exposed to projective non-Euclidean geometry, as Klein himself noted when in 1910 he delivered a lecture on this approach to Minkowski space.<sup>35</sup> But what Einstein clearly did understand were the serious implications Klein's mathematical argument carried for his Machian approach to cosmology. For if the metric tensor and with it the G-field were "*restlos*

---

<sup>32</sup> Pierre Kerszberg, *The Invented Universe: The Einstein–De Sitter Controversy (1916–17) and the Rise of Relativistic Cosmology*. Oxford: Clarendon Press, 1989.

<sup>33</sup> See John Earman and Jean Eisenstaedt, "Einstein and Singularities," *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 30B (1999): 185-235.

<sup>34</sup> Felix Klein, "Über die Integralform der Erhaltungssätze und die Theorie der räumlich-geschlossenen Welt." *Königliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Mathematisch-physikalische Klasse. Nachrichten* (1918): 394–423. Felix Klein, "Über die sogenannte Nicht-Euklidische Geometrie," *Mathematische Annalen* 4 (1871): 573–625.

<sup>35</sup> Felix Klein, "Über die geometrischen Grundlagen der Lorentzgruppe," *Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung* 19 (1910): 281–300, p. 281.

durch die Massen der Körper bestimmt,” as Einstein asserted, then de Sitter’s model must somehow be untenable, either physically or mathematically. Since Einstein conceded that Klein’s approach was mathematically sound, he was faced with a non-trivial, matter-free solution to his field equations with cosmological term. Were the resulting space-time manifold physically viable, as de Sitter claimed it was, then this model would flagrantly contradict Mach’s principle. For in de Sitter space the G-field, which determines the inertial properties of matter, exists in a pure vacuum!

Einstein’s initial response was to suggest that the natural horizon in de Sitter’s model constituted a real barrier along or beyond which matter had to be found. In 1917, the physical status of this horizon was quite unclear; moreover, differential geometers had not yet developed the tools needed to explore the intrinsic geometry of a Lorentzian manifold. Einstein’s hunch suggested that de Sitter’s solution to the field equations made sense only within a limited portion of the universe. Mathematically, this boiled down to showing that it was impossible to find a patchwork of coordinate systems that covered de Sitter space without introducing singularities. Since Klein’s global approach to de Sitter’s model seemed to block this avenue, Einstein was forced to invoke a physical argument, hence his proposal that the horizon was the seat of “hidden matter” that produced the curvature of space in de Sitter’s model.

Such a bold physical interpretation of a purely mathematical construct clearly had limited appeal for skeptical minds like those of de Sitter and Klein. Still, Einstein’s argument was not lost on Hermann Weyl, who of course had a complete mastery of the mathematical arguments that Einstein’s friendly opponents had put on the table. Indeed, in the first edition of *Raum-Zeit-Materie*, Weyl took up Einstein’s cause, claiming with regard to de Sitter’s world: “. . . one sees that the possibility of an empty world contradicts the laws of nature. . . . At least at the horizon there must exist masses.”<sup>36</sup> Hubert Goenner has recently shown how Weyl expended great effort concocting a global space-time purportedly equivalent to de Sitter’s, but containing matter.<sup>37</sup> Weyl achieved this by pasting three different metrics together, though apparently it took some time before he realized that this did not yield a manifold of constant curvature, a key property of de Sitter’s model. By 1923, when he published the fifth edition of *Raum-Zeit-Materie*, Weyl not only acknowledged that de Sitter’s matter-free space-time was a legitimate cosmological model but even argued that it was superior to Einstein’s cylindrical universe. Soon thereafter, he publicly adopted a position on Mach’s principle similar to Sitter’s (see Röhle’s section 5.1) by disavowing the Machian gospel according to Einstein.<sup>38</sup> Weyl’s struggle to reach a harmonious balance between mathematical representations and their potential physical meanings was deeply affected by his engagement with Einstein’s general theory of relativity.<sup>39</sup> Having played a key part in what he himself regarded as a scientific theory of world-historical significance, Weyl recognized by 1924 that his *Sturm und Drang* period had ended when the relativity revolution began to subside.

Since my opening remarks have centered on the Machian elements that ran through contemporary discourse on general relativity, it should be added in closing that the studies by Kohl, Rosenberger, and Röhle take up several other issues of importance during this period of explosive activity and debate. Indeed, all three authors show that by focusing on the parts

---

<sup>36</sup> Hermann Weyl, *Raum-Zeit-Materie. Vorlesungen über allgemeine Relativitätstheorie*. Berlin: Springer, 1918, p. 225.

<sup>37</sup> Hubert Goenner, “Weyl’s Contributions to Cosmology,” in Erhard Scholz, ed., *Hermann Weyl’s Raum-Zeit-Materie and a General Introduction to his Scientific Work*. (DMV Seminar, 30.) Basel/Boston: Birkhäuser Verlag, 2001, pp. 105-137.

<sup>38</sup> Hermann Weyl, “Massenträgheit und Kosmos. Ein Dialog,” *Die Naturwissenschaften* 12 (1924): 197-204.

<sup>39</sup> For a sensitive and probing account of Weyl’s interests and intellectual development during this period, see Erhard Scholz, “Weyl’s Infinitesimalgeometrie, 1917-1925,” in Scholz, ed., *Hermann Weyl’s Raum-Zeit-Materie and a General Introduction to his Scientific Work*, pp. 48-104.

played by “secondary actors” like Mie, Thirring, and de Sitter, many new perspectives quickly emerge. Considering the enormous popular and scholarly literature dealing with Einstein and the general theory of relativity, it would seem both appropriate and timely for historians to take a closer look at the individuals and communities most directly involved with these developments. Many, of course, rode relativity’s waves. Yet not just a few helped make them, while others tried to resist their tidal force. We are still far from having a full picture of the twentieth century’s most dramatic scientific revolution.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>1 Elektrodynamik und Gravitation vor 1915</b>	<b>3</b>
1.1 Vorbemerkungen . . . . .	3
1.2 Elektromagnetisches Weltbild und Feldtheorien vor Mie . . . . .	3
1.2.1 Elektromagnetisches und geometrisches Programm . . . . .	3
1.2.2 Entwicklung des elektromagnetischen Weltbildes . . . . .	4
1.2.3 Einheitliche Feldtheorie: Einsteins 1. Versuch (1908-1910) . . . . .	7
1.2.4 Der nächste Versuch: Auf dem Weg zu Mies Theorie . . . . .	9
1.3 Relativitätsprinzip, Vierervektoren und Sechservektoren . . . . .	10
1.3.1 Zur Etablierung des speziellen Relativitätsprinzip . . . . .	11
1.3.2 Vierervektoren . . . . .	12
1.3.3 Sechservektoren . . . . .	12
1.3.4 Rechenoperationen, Invarianten und Differenzialoperationen nach Laue . . . . .	13
<b>2 Zu den Grundlagen einer Theorie der Materie</b>	<b>17</b>
2.1 Gustav Mie - Die Biographie . . . . .	17
2.2 Das Ziel der Theorie der Materie . . . . .	19
2.3 Annahmen und Feldgleichungen der Materietheorie . . . . .	20
2.3.1 Mies heuristische Grundlagen . . . . .	20
2.3.2 Herleitung der Feldgleichungen aus den Prinzipien . . . . .	22
2.4 Die Energie und das Hamiltonprinzip . . . . .	24
2.4.1 Vom Energieprinzip zur Weltfunktion . . . . .	24
2.4.2 Alternativer Ansatz: Das Hamiltonprinzip liefert die Feldgleichungen . . . . .	25

2.5	Die Gravitation im Rahmen der Theorie der Materie . . . . .	27
2.6	Die Schwierigkeiten mit der Theorie der Materie . . . . .	30
2.6.1	Unauffindbare Weltfunktion . . . . .	30
2.6.2	Das Superpositionsprinzip versagt . . . . .	31
2.6.3	Relativität des Gravitationspotentials . . . . .	32
2.7	Zum Stellenwert der Theorie der Materie in der Geschichte der Physik . . . . .	34
2.7.1	Born macht Hilbert auf Mies Theorie neugierig . . . . .	35
2.7.2	Hilberts Adaption der Mieschen Theorie . . . . .	39
2.7.3	Einstein zu den Theorien von Mie und Hilbert . . . . .	41
2.7.4	Weitere Einflüsse der Mieschen Theorie . . . . .	44
2.7.5	Zu den nichtlinearen Theorien von Born und Infeld . . . . .	46
<b>3</b>	<b>Verfangen in der Allgemeinen Relativität</b>	<b>49</b>
3.1	Vom „glücklichsten Gedanken“ zur „größten Eselei“ - eine Skizze von Einsteins Weg zur ART . . . . .	49
3.2	Die grundlegenden Prinzipien in Einsteins ART . . . . .	53
3.3	Äquivalenzprinzip in der Schwebel . . . . .	55
3.3.1	Der Zeitplan . . . . .	56
3.3.2	Welchem Zweck dient dieses Prinzip? . . . . .	58
3.3.3	Reaktionen der Kollegen . . . . .	59
<b>4</b>	<b>Die Diskussionen zwischen Albert Einstein und Gustav Mie</b>	<b>63</b>
4.1	Vorbemerkungen . . . . .	63
4.2	Verärgert: Versammlung in Wien und die hitzige Polemik . . . . .	65
4.2.1	Der Wien-Vortrag . . . . .	66
4.2.2	Die Wien-Diskussion . . . . .	70



4.2.3	„Hitzige Polemik“ . . . . .	75
4.3	Geadelt: Der Briefwechsel Mie - Einstein . . . . .	80
4.3.1	Vorbemerkungen . . . . .	80
4.3.2	Parallelenaxiom, $\lambda$ -Konstante und relativistischer Standpunkt . . . . .	82
4.3.3	Bedeutung der allgemeinen Relativität . . . . .	88
4.3.4	Es gibt keine physikalische Relativität der Rotation . . . . .	94
4.3.5	Mie erkennt sein Materiekonzept . . . . .	96
4.3.6	Wahl von Koordinatensystemen . . . . .	98
4.3.7	Einstein: einmal Mathematiker - einmal Physiker? . . . . .	102
4.4	Was lernten beide aus diesen Diskussionen? . . . . .	103
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>105</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>107</b>
	<b>Personenverzeichnis</b>	<b>117</b>

# Einleitung

So soll ich denn mit saurem Schweiß  
Euch lehren, was ich selbst nicht weiß.<sup>1</sup>

An dieser Stelle sollte zum einen erläutert werden, was der Titel aussagt und mit welchen Erwartungen diese Arbeit gelesen werden sollte. Mit diesem Titel sind drei Anliegen verbunden:

Zum einen heißt es „Relativität in der Schweben“ - dabei geht es natürlich um die Geschichte der allgemeinen Relativitätstheorie (ART) und insbesondere um die Schwierigkeiten, denen Albert Einstein auf dem Weg zur Aufstellung der ART von 1907 bis 1915 begegnete und die auch anschließend nicht abebbten. Es ist in der Öffentlichkeit wahrscheinlich kaum bekannt, dass die grundlegenden Prinzipien der ART nicht unumstritten sind und waren.

Zum anderen heißt es: „Die Rolle von Gustav Mie“ - hier geht es um eine sehr spezielle Geschichte, denn Gustav Mie stellte 1912, also in der angesprochenen Epoche, eine zunächst vielversprechende Alternative zu Einsteins Gravitationstheorie von 1913 auf und trat somit als vorübergehender Gegner von Einstein auf. Seine Rolle wandelte sich zum kritischen Befürworter der ART ab 1916 und trug somit dazu bei, dass die Bedeutung der grundlegenden Prinzipien der ART genauer durchdacht wurde.

Schließlich ist der Titel als Ganzes zu sehen, was den schwierigsten Punkt ausmacht. Denn die Rolle von Gustav Mie innerhalb der Geschichte der ART ist keine Hauptrolle, im Gegenteil: Mie spielt eine Nebenrolle, die wohl kaum an entscheidenden Fortschritten innerhalb dieser Thematik beteiligt war. Aber dennoch ist Mie in diesem Rahmen gesehen eine interessante Figur, die in der Schweben der ART und in der Schweben gerade der Zeit um 1915 als Beispiel für den Physiker schlechthin steht: Zwischen der neuen und der alten Physik, zwischen theoretischer und experimenteller Physik, zwischen bewahrend konservativ und suchend erneuernd.

Da nun diese drei Bereiche nicht unbedingt zusammengehören, ergibt sich die Schwierigkeit, diese drei Aspekte homogen darzustellen und es war nicht zu vermeiden, hier und da Sprünge in der Erzählung einzubauen.

Weil Mie als Person im Gegensatz zu Einstein als eher unbekannt anzusehen ist, wird kurz seine Person im Abschnitt (2.1) dargestellt. Der Mieschen „Theorie der Materie“, als vorübergehendem Konkurrenten zur ART und als Schritt in der Geschichte der vereinheitlichten Theorien, wird der erste Teil des Kapitels (2) gewidmet. Den geschichtlichen Rahmen zu Mies Theorie bilden das Kapitel (1) und der zweite Teil von Kapitel (2). Kapitel (1) enthält Auszüge aus der

---

<sup>1</sup> Aus Goethes Faust. Zugegeben, diese Idee stammt von Ludwig Boltzmann, der dieses Zitat an den Anfang seiner Arbeit über den Elektromagnetismus stellte.

Vorgeschichte mit diversen Stationen auf der Suche nach einer vereinheitlichten Theorie der Physik, zum Teil auf der Basis des elektromagnetischen Weltbildes. Dieses Kapitel enthält auch Klärendes zum Speziellen Relativitätsprinzip und dessen mathematischen Formalismus, auf dem die Theorie der Materie aufbaut. Im Anschluss an Mies Theorie der Materie wird deren Einfluss auf verschiedene Wissenschaftler wie Hermann Weyl, Max Born und David Hilbert dargestellt.

Als Brücke zur Diskussion zwischen Einstein und Mie dient der Abriss über die Entwicklung der ART in Kapitel (3), dort wird ein besonderer Blick auf die konzeptuellen Schwierigkeiten mit dem Äquivalenzprinzip und dem allgemeinen Relativitätsprinzip geworfen.

Schließlich wird in Kapitel (4) versucht, die Facetten der Beziehung zwischen Einstein und Mie darzustellen. Die wichtigsten Begegnungen zwischen beiden spielten sich zum einen 1913/14 im Streit um die richtige Gravitationstheorie ab, zum anderen gab es 1917/18, nachdem Mie Einsteins Theorie an sich akzeptierte, Diskussionen um die Bedeutung der subtilen Grundlagen der ART und schließlich trat Mie versuchsweise als Vermittler zwischen den Fronten auf der Bad Nauheimer Naturforscherversammlung im September 1920 auf. Der letzte Punkt wurde in dieser Arbeit jedoch ausgeschlossen, da er thematisch zu weit von den anderen Themen entfernt war, zwischendurch wurden jedoch ein paar Andeutungen hierzu eingestreut. Die ersten beiden Begegnungen sollen die Unsicherheiten demonstrieren, die zu Beginn mit dem Thema ART zum einen beim Begründer selbst, aber auch bei den der ART aufgeschlosseneren Physikern wie zum Beispiel Gustav Mie vorhanden waren.

Als Quellen lagen die *Collected Papers of Albert Einstein* inklusive der Briefwechsel von Einstein bis zum Jahr 1918 vor, zum anderen die Werke von Mie zur Theorie der Materie und zur Gravitation von 1907 bis 1921. Die Sekundärliteratur ist vor allem durch die Reihe der *Einstein Studies* geprägt. In Bezug auf Mie ist die Lage in der Sekundärliteratur eher dürftig.

---

# 1 Elektrodynamik und Gravitation vor 1915

## 1.1 Vorbemerkungen

Da dieser Arbeit als Schwerpunkt zum einen die Miesche Theorie der Materie und zum anderen die Diskussionen um Prinzipien der ART unterliegen, ist an dieser Stelle eine geschichtliche Einordnung dieser beiden Punkte angebracht. Es wird das Umfeld angedeutet, in dessen Rahmen Gustav Mies Theorie der Materie entstanden ist (Abschnitt 1.2): Eine Zeit lang lebten die Physiker in der Hoffnung, große Teile der Physik im Sinne des Elektromagnetismus zu beschreiben, wurden jedoch von den rasanten Entwicklungen in der Experimentalphysik und den neuartigen Entdeckungen im Rahmen der Quantenphysik und der speziellen Relativitätstheorie (SRT) ab etwa 1900 vor größere Schwierigkeiten gestellt. Ebenso spielten die Entwicklungen in der SRT in Mies Theorie eine entscheidene Rolle und der von ihm verwendete Formalismus ist heute eher unüblich. Deshalb wird in Abschnitt (1.3) ein Überblick über die Rezeption der SRT nach 1905 und eine kurze Einführung in die von Arnold Sommerfeld im Anschluss an Hermann Minkowski entwickelte vierdimensionale Notation gegeben.

## 1.2 Elektromagnetisches Weltbild und Feldtheorien vor Mie

### 1.2.1 Elektromagnetisches und geometrisches Programm

Mies Theorie der Materie hatte in dem Programm, ein elektromagnetisches Weltbild<sup>2</sup> zu erstellen eine wichtige Stellung. Weiterhin steht diese Theorie auch im Zusammenhang mit dem relativistischen Programm sowie dem Programm, die physikalischen Erscheinungen mit Hilfe von geometrisierten Feldern zu erfassen. In diesem Kapitel wird der historische Rahmen, in dem Mies Theorie der Materie zu sehen ist, erläutert. Die Informationen stammen vor allem aus den ersten Kapiteln aus Vizgins Buch über die vereinheitlichten Feldtheorien<sup>3</sup>.

Das Programm des elektromagnetischen Weltbildes hatte zum Ziel, alles was existiert mit Hilfe elektromagnetischer Erscheinungen, im Extremfall mit ausschließlicher Hilfe des elektromagnetischen Feldes, zu beschreiben. Die Wurzeln dieses Programmes liegen zwar einige Jahrzehnte vor den Arbeiten von H.A. Lorentz, aber mit ihm wird der Beginn des Programmes identifiziert. Die Ziele

---

<sup>2</sup> Hier wird nicht zwischen den Begriffen *Programm*, *Konzept* oder *Weltbild* differenziert, Unterschiede darin spielen in dieser Arbeit keine Rolle.

<sup>3</sup> Chapter 1 von [Vizgin 1994] für die Abschnitte (1.2.1) - (1.2.3).

zu verschiedenen Zeiten waren jeweils Masse, Gravitation, Eigenschaften starrer Körper und später sogar die Erscheinungen der Quantenphysik auf elektromagnetische Konzepte zu reduzieren.

Die zugrundeliegenden Gleichungen waren meist James Maxwells Gleichungen oder diverse Abänderungen davon. Mit dem Aufkommen der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) ab 1905 entstanden Konflikte zwischen der SRT und dem elektromagnetischen Programm. Der Äther spielte in diesem Programm oftmals eine zentrale Rolle wurde aber durch die SRT in Frage gestellt. Vertreter des elektromagnetischen Weltbildes wie Mie akzeptierten jedoch beide Vorstellungen, sie tauschten lediglich den Raum, in dem sich das physikalische Geschehen abspielt, aus: Es fand nun alles im vierdimensionalen pseudoeuklidischen Raum statt, im Gegensatz zu dem dreidimensionalen euklidischen Raum zuvor. Dabei gab es keine Interaktionen zwischen Raum und physikalischen Vorgängen, der Raum war im Gegensatz zur späteren Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) nur der Ort, an dem das physikalische Geschehen stattfindet.

Als die ART mit der Deutung von Gravitationserscheinungen als Krümmungen im vierdimensionalen Raum weitergehend akzeptiert wurde, gab es Aussicht, im Gegensatz zum elektromagnetischen Weltbild, die Physik mit Hilfe von geometrischen Konzepten zu beschreiben. Ab etwa 1920 stellte man sich zum Beispiel die elektromagnetischen Erscheinungen als Effekte von Verdrehungen eines geeigneten pseudoriemannschen Raumes vor, oder mit Hilfe einer zusätzlichen 5. Dimension<sup>4</sup>, wobei nun die fünf Dimensionen ähnlich wie in der ART behandelt wurden.

### 1.2.2 Entwicklung des elektromagnetischen Weltbildes

Der zentrale Kern des elektromagnetischen Weltbildes wurde von den maxwellischen Gleichungen der Elektrodynamik gebildet. Maxwell stellte Mitte der 1860er Jahre das Gleichungssystem auf, mit dem die Erscheinungen der Elektrizität, des Magnetismus und, wie Heinrich Hertz es später eindrucksvoll demonstrierte, auch die Optik gemeinsam erfasst werden konnten<sup>5</sup>. Die bis dahin (und weiter) dominierende Physik war von der Newtonschen Mechanik geprägt, in der im Gegensatz zur Elektrodynamik Kräfte unmittelbar über große Entfernungen wirkten. Dementsprechend waren Begriffe wie „Äther“ weit verbreitet und für viele sogar noch in den 1920er Jahren von Bedeutung.

Ab 1892 spielte Lorentz eine zentrale Rolle in der Weiterentwicklung des elektro-

---

<sup>4</sup> Diese wurde von Kaluza vorgeschlagen, dazu siehe [Vizgin 1989, S. 149 ff]. Auch die Arbeiten von Weyl, besonders sein Buch *Raum-Zeit-Materie*, [Weyl 1918] behandelte die Elektrodynamik im Sinne von geometrischen Erscheinungen.

<sup>5</sup> Siehe [Simonyi 1990, S. 344-353].

magnetischen Weltbildes, man spricht eigentlich erst mit ihm von diesem Bild. Er modifizierte Maxwells Theorie zur Elektronentheorie und wurde dabei von den Arbeiten aus den 1870er Jahren von Weber geleitet. In Lorentz Theorie spielten die geladenen Teilchen eine gleichwertige Rolle wie das Feld, so dass noch nicht von einem elektromagnetischen Weltbild im Sinne der Feldtheorien gesprochen werden kann, in dem ausschließlich dem Feld Realität zugesprochen wird. Dieser Übergang geschah mit Wiechert und Larmor, die ab 1894 dem Äther eine wichtigere Rolle zuschrieben; sie glaubten, dass angeregte Zustände des Äthers für die Herausbildung von Elektronen verantwortlich waren. Beide hofften, dass sich Newtons Gesetze aus denen der Elektrodynamik ableiten ließen und dabei zum Beispiel die Masse auf elektromagnetische Effekte zurückzuführen war.

Die Eigenschaften und die Konstitution des Elektrons standen lange Zeit in der Debatte. Lorentz entwickelte seine Elektronentheorie weiter und kam 1899 zu dem Ergebnis, dass alle Teilchen einer Kontraktion unterworfen sein mussten, sobald sie in Bewegung waren, die Kontraktion sollte mit der Geschwindigkeit zunehmen<sup>6</sup>. Mit diesen Ideen wurden die Zweifel an der klassischen Mechanik lauter und das elektromagnetische Programm rückte weiter in den Mittelpunkt des Interesses. Dabei blieben auch Versuche (unter anderem von Wilhelm Wien und Lorentz) nicht aus, die Gravitation im Rahmen der Elektrodynamik zu erklären. Das Hauptziel, Gravitation und Elektromagnetismus in einer Theorie zu behandeln wurde immer deutlicher.

Eine weitere wichtige Rolle fiel Max Abraham zu, der ab 1902 danach strebte, eine Alternative zu Lorentz Elektronentheorie aufzustellen. Abraham ging dabei von einem starren Elektron aus. Die Frage nach der Elektrodynamik bewegter Körper und besonders die nach dem Massenzuwachs bewegter Körper wurde bedeutender. Der Göttinger Experimentalphysiker Kaufmann stellte 1901 fünf Forderungen an die physikalische Forschung für die nächsten Jahre:

- Es soll experimentell bewiesen werden, dass die gesamte Masse des Elektrons auf seine elektromagnetische Masse zurückgeführt werden kann.
- Die Mechanik muss systematisch auf den Elektromagnetismus zurückgeführt werden.
- Es fehlt ein experimenteller Beweis, dass die Materie ausschließlich aus Elektronen besteht.
- Der Zusammenhang des Periodensystems der Elemente mit den Zuständen des Elektrons im Atom muss hergestellt werden.

---

<sup>6</sup> Eine andere Geschwindigkeitsabhängigkeit wurde schon 1893 von J.J. Thomson für die elektromagnetische Masse gefordert, siehe [Vizgin 1994, S. 8-9].

- Der experimentelle Beweis, dass die Gravitation mit Hilfe des Elektromagnetismus (nach Wiens Theorie) erklärt werden kann, muss gebracht werden.

Damit waren die Ziele des elektromagnetischen Programms durch Kaufmann klar beschrieben. Den Höhepunkt des elektromagnetischen Programms bildeten die ersten Jahre des 20. Jahrhunderts, in denen zum Beispiel J.J. Thomson der experimentelle Nachweis von Elektronen gelang oder etwas später Kaufmann und andere mit der Massenzunahme der Elektronen experimentierten.

Mit der Etablierung der speziellen Relativitätstheorie (SRT) kamen die ersten Zweifel an dem elektromagnetischen Programm auf. Die SRT kam vollkommen ohne das Ätherkonzept aus, das in dem bisherigen Programm eine zentrale Rolle spielte. Auf der anderen Seite waren die dynamischen Gleichungen der Lorentz-schen Elektronentheorie mit den Forderungen der SRT vereinbar, die Gleichungen Abrahams jedoch nicht. Es dauerte nach 1905 etwa weitere fünf Jahre, in denen Experimente als Belege für die Abrahamsche Theorie gedeutet wurden und Physiker von der „Lorentz-Einstein-Theorie“ redeten. In dieser Zeit konkurrierten Abrahams und „Lorentz-Einsteins“ Theorien.

Die berühmten Arbeiten von Minkowski zur SRT im Jahr 1908 können als Wendepunkt gesehen werden, die SRT erreichte größerer Bedeutung und ihre Grundlegenden Prinzipien wurden allgemein anerkannt. Die Folge war, dass Abrahams Theorien verworfen werden mussten und mit dem zuvor recht großen Vertrauen in Abrahams Elektronentheorie schwand auch das daran geknüpfte Vertrauen in das elektromagnetische Weltbild.

Die Entwicklung in der Quantenphysik, die mit Max Plancks Strahlungsformel 1900 begann und besonders durch Einstein ab 1905 gefördert wurde, hatte ihren ersten Höhepunkt mit der Solvey-Konferenz 1911. Auch den Quanteneffekten wurden ab dieser Zeit größere Bedeutung beigemessen: Mit der wachsenden Bedeutung der Quantenphysik sank die des elektromagnetischen Programms, das nicht im geringsten in der Lage war auf die Effekte der Quantentheorie zu reagieren. Trotzdem waren einige Physiker, zum Beispiel Planck, noch nicht bereit, die Realität der Quanten zu akzeptieren. Da die Ansätze auf der Grundlage der Maxwell-Lorentz-Gleichungen die Quanteneffekte nicht beschreiben konnten, wurden Versuche gestartet, durch geschickte Abänderungen der Gleichungen zum Erfolg zu kommen. Hierzu zählen vor allem die Versuche von Einstein (1908-1910) und Mie (1912-1913).

Beide hatten, wenn auch mit verschiedenen Methoden, zum Ziel, die Effekte der Gravitation, der Quantenphysik und die korpuskulare Erscheinung der Materie auf Grundlage des elektrischen Feldes abzuleiten. Dabei wurde die SRT, die ursprünglich dem elektromagnetischen Feldkonzept entgegenlief, nun als Werkzeug auf dem Weg zu einer neuen, geeigneten Theorie genutzt. Mittlerweile hatte man

verstanden, dass die Maxwellsche Elektrodynamik mit der SRT vereinbar war. Die Theorien von Einstein und Mie waren wichtige Vorläufer der späteren geometrisierten Feldtheorien der 1920er- und 1930er Jahre. Besonders Mies Theorie wurde 1915/16 von Hilbert benutzt, um die erste vereinheitlichte Theorie auf der Basis der ART aufzustellen. Zur Mieschen Theorie und dem Einfluss auf Hilbert wird in einem späteren Kapitel (2) mehr gesagt werden.

### 1.2.3 Einheitliche Feldtheorie: Einsteins 1. Versuch (1908-1910)

Die Vorgeschichte der Jahre 1905 bis 1907 wird hier als bekannt vorausgesetzt, Einsteins Beiträge zur SRT und zur Quantentheorie müssen hier nicht näher erläutert werden. Es sei lediglich erwähnt, dass die SRT zwar dem Ätherkonzept, aber nicht dem Feldkonzept entgegenstand und Einstein an der Wichtigkeit des Feldkonzepts festhielt.

Gegen Ende des Jahres 1907 entdeckte Einstein einen Zusammenhang zwischen Relativitätsprinzipien und Gravitation<sup>7</sup> und konnte schon zwei mögliche Tests angeben (Lichtablenkung, Rotverschiebung), die seine Ideen bestätigen könnten. Jedoch hatte Einstein Schwierigkeiten, diese Ideen auszubauen. Auf dem Gebiet der Quantenphysik fiel es Einstein leichter Fortschritte zu machen. In diesem Zusammenhang wurde Einstein auf eine mögliche Verbindung zwischen Quantenphysik und Elektrodynamik aufmerksam, die er in einem Artikel für die *Physikalische Zeitschrift* im Januar 1909 darlegte:

„Das Wichtigste dieser Ableitung liegt darin, daß durch sie die Lichtquantenkonstante  $h$  auf das Elementarquantum  $\epsilon$  zurückgeführt wird. [...] Es scheint mir nun aus der Beziehung  $h = \frac{\epsilon^2}{c}$  hervorzugehen, daß die gleiche Modifikation der [Maxwell-Lorentzschen] Theorie, welche das Elementarquantum  $\epsilon$  als Konsequenz erhält, auch die Quantenstruktur der Strahlung als Konsequenz erhalten wird. Es wird die Fundamentalgleichung der Optik

$$D(\varphi) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (1)$$

zu ersetzen sein durch eine Gleichung, in der auch die universelle Konstante  $\epsilon$  (wahrscheinlich im Quadrat derselben) in einem Koeffizienten auftritt.“<sup>8</sup>

Einstein setzte seine Hoffnung darauf, dass die Größen  $h$  und  $\epsilon^2/c$  sowohl in den Einheiten als auch in der Größenordnung übereinstimmten und versuchte sich an

---

<sup>7</sup> Zum Äquivalenzprinzip siehe Kapitel (3).

<sup>8</sup> [Einstein 1909, S. 192-193]



verschiedenen Verallgemeinerungen der Maxwell-Gleichungen.

Dabei waren, wie später auf dem Weg zur ART, heuristische Ideen seine Leitmotive: Einstein verlangte, dass die verallgemeinerten Maxwell-Gleichungen zum einen lorentzinvariant sein müssen, also die SRT gültig bleibt, und zum anderen die klassischen Maxwellgleichungen als Grenzfall enthalten sein müssen. Als mögliche Verallgemeinerungen sah Einstein nichtlineare oder inhomogene Gleichungen, Gleichungen von höherem Grad, sowie Kombinationen davon an.

Die nichtlinearen Gleichungen weckten zu Beginn in Einstein die Hoffnung, daraus korpuskulare Eigenschaften ableiten zu können, da diese mit homogenen Gleichungen nicht zu erreichen waren. Als dieser Ansatz nicht zum gewünschten Erfolg führte, versuchte Einstein mit Gleichungen von höherem Grad, zum Beispiel für die elektromagnetischen Potentiale in der Form

$$\Delta\Phi - \lambda^2\Delta\Delta\Phi = 0, \quad (2)$$

zu allgemeineren Lösungen zu gelangen, die in verschiedenen Grenzbeziehungen entsprechende Deutungen zuließen. Obige Potentialgleichung hat als Lösung

$$\Phi = \epsilon \frac{1 - e^{-r/\lambda}}{r} \quad (3)$$

zur Folge. Dabei ist  $\epsilon$  unbestimmt und sollte über die Feldgleichungen als elektrische Ladung bestimmt werden können. Diese Lösung beinhaltet zum Beispiel für große Werte von  $r$  als Grenzfall die klassische zu  $1/r$  proportionale Lösung und ist für kleine  $r$  nicht singulär. Einstein erreichte es noch, die Potentialgleichung lorentzinvariant zu gestalten, stellte aber schon bald fest, dass es nicht möglich war, aus den entsprechenden Feldgleichungen vierten Grades einen bestimmten Wert für  $\epsilon$  zu erhalten.

Vizgin<sup>9</sup> vermutet, dass Einstein seine Erfolgslosigkeit, eine geeignete Feldtheorie aufzustellen, darauf zurückführte, dass die Lorentzgruppe allein noch eine zu kleine Grundlage bildete. Entsprechend dieser Vermutung setzte Einstein ab dem Sommer 1910 seine Bemühungen auf dem Gebiet der Gravitation verstärkt fort. Einstein wird sich nach dem Erfolg der ART ab den 1920er Jahren jedoch erneut dem Ziel, eine einheitliche Theorie zu ersinnen, widmen. Es ist interessant zu sehen, wie Einstein schon auf seiner ersten Suche nach einer umfassenderen Theorie mit den heuristischen Annahmen spielte und bereit war, verschiedene Wege einzuschlagen. Nach McCormach<sup>10</sup> sammelte Einstein hier Erfahrungen, die ihm auf dem Weg zur ART hilfreich waren.

---

<sup>9</sup> [Vizgin 1994, S. 26]

<sup>10</sup> [McCormach 1970]

#### 1.2.4 Der nächste Versuch: Auf dem Weg zu Mies Theorie

Die nächsten Schritte auf der Suche nach einer vereinheitlichten Feldtheorie wurden von Gustav Mie beschrritten. Er war im Gegensatz zu Einstein stets ein Verfechter des elektromagnetischen Konzepts. Trotzdem nahm er sich der SRT an und akzeptierte sie im selben Maße wie die Feldkonzepte. Mie sah keinen Widerspruch der SRT zu den Ätherkonzepten, er wehrte sich jedoch gegen die mechanistische Darstellungen des Äthers, denn er hatte seine eigene Vorstellung von der Natur der Materie entwickelt, die später prägend für seine Theorie der Materie war: Die Trägheit eines Teilchens ist nach Mie die des entsprechenden Feldes und die bisher bekannten physikalischen Prozesse spielen sich nach ihm nicht auf kleinsten Räumen beschränkt ab, sondern in der Umgebung der agierenden Teilchen. Die klassische Mechanik spielt demnach nur noch in makroskopischen Bereichen eine Rolle, denn

„Die materiellen Teilchen sind nichts anderes als Knotenstellen der Kraftfelder im Äther, sie sind Energieknoten in ihm. Es gibt nur eine einheitliche Weltsubstanz, in welcher sich alle physikalischen Vorgänge abspielen, das ist der Weltäther. Auch die sog. materiellen Vorgänge sind weiter nichts als das Spiel der Feldlinien in ihm, Die Bewegung eines materiellen Teilchens besteht darin, daß der Ätherzustand, der das Wesen eines Teilchens ausmacht, von Ort zu Ort übertragen wird, und dabei wandert natürlich auch der Knotenpunkt mit.“<sup>11</sup>

Die Natur der Materie ist für Mie keine atomistische, sondern vom Feldkonzept geprägt. Demnach gilt es nicht, den Äther mechanisch zu erklären, sondern Materie muss elektromechanisch erklärt werden. Zu seinem Ätherbegriff gibt Mie oft Erklärungen ab, besonders deutlich wird er in seinem populärwissenschaftlichen Buch über die Einsteinsche Gravitationstheorie von 1921. Dort dient als Grundlage der Ätherdefinition die Gleichbehandlung der Begriffe *leer*, *homogen* oder *gleichförmig*: Der Äther ist an sich nicht wahrnehmbar und hat keine Eigenschaften, wie wir sie aus unserer mechanischen, makroskopischen Welt kennen. Im Allgemeinen erscheint er uns als leer. Da in dieser Leere jedoch Platz für physikalische Erscheinungen wie Licht oder elektrisches Feld ist, schreibt Mie ihm eine Daseinsberechtigung zu:

„Aber dies ‘Leere’ kann sich mit physikalischen Vorgängen, beispielsweise Lichtwellen erfüllen, es kann der Schauplatz physikalischer Erscheinungen werden. Insofern das Leere physikalisch existiert und

---

<sup>11</sup> [Mie 1941, S. 608]

Objekt der Naturforschung sein kann, nennen wir es auch noch heutigentags *Äther*.“<sup>12</sup>

Neben der Eigenschaft Licht durchzulassen hat der Äther noch weitere Eigenschaften: ein elektrisch geladenes Teilchen oder ein Magnet kann unter gewissen Umständen in diesem leeren Raum Kraftwirkungen erfahren. Folglich spricht Mie von dem elektromagnetischen Feld als eine der Größen, mit denen man den Äther beschreiben kann. Der Äther ist demnach die Menge aller Orte, in denen gewisse physikalische Vorgänge stattfinden können.

Zu Mies Vorstellung der Materie als Singularitäten oder Knoten im Äther sollte man an die 1876 von Sir William Thomson und Peter Tait geäußerte Vorstellung erinnern: „The mathematical work of the present paper has been performed to illustrate the hypothesis, that space is continuously occupied by an incompressible frictionless fluid acted on by no force, and that material phenomena of every kind depend solely on motions created in the liquid“<sup>13</sup>. Mit den Bewegungen waren dort Vortices<sup>14</sup> in dieser Flüssigkeit gemeint, deren Stabilität und Überlagerungseigenschaften für die materiellen Erscheinungen verantwortlich sein sollten. Thomson und Tait stellten sich sogenannte „Vortex-Atome“ vor.

Im Kapitel (2) werden wir uns näher mit Mies Theorie beschäftigen. Im Anschluss daran wird der weitere Einfluss seiner Theorie auf Hilbert, Weyl und Born dargestellt.

### 1.3 Relativitätsprinzip, Vierervektoren und Sechservektoren

Für Gustav Mie war das Relativitätsprinzip der Einsteinschen Theorie von 1905 ohne Bedenken gültig, weshalb Mies Theorie sich entsprechend formulieren lassen musste. Folglich drückte Mie die Terme seiner Gleichungen so in „Vierervektoren“ und „Sechservektoren“ aus, dass die Gleichungen gegenüber Lorentztransformationen forminvariant blieben. Dieser Abschnitt geht kurz auf die Adaption dieser Mathematik durch die SRT ein und stellt ein paar grundlegende Operationen vor, damit in späteren Abschnitten darauf verwiesen werden kann.

---

<sup>12</sup> Aus: [Mie 1921, S. 27], eine ähnliche Position bezieht Mie in: [Mie 1941].

<sup>13</sup> Siehe [DSB 1975, Band XIII, S. 385] für dieses Zitat, weitere Anmerkungen und Hinweise.

<sup>14</sup> Vortices haben im Wesentlichen die Form von Reifen, in diesem Reifenbereich herrschen spezielle Strömungsverhältnisse, die äußerst stabil sind. Dies wird hin und wieder im Zirkus von rauchenden Zauberern eindrucksvoll demonstriert.

### 1.3.1 Zur Etablierung des speziellen Relativitätsprinzip

Der Formulierung der SRT mit Hilfe der Vierer- und Sechservektoren ging die Minkowskische Formulierung mit Hilfe des Matrixkalküls voraus. Diese Mathematik war schon seit Arthur Cayley bekannt, lediglich die Anwendung in der SRT war neu<sup>15</sup>. Von Minkowski stammten dazu zwei wesentliche Beiträge aus dem Jahr 1908: Es gab zum einen den Artikel in den *Göttinger Nachrichten* im April und zum anderen den berühmten Vortrag in Köln im Herbst dieses Jahres.

In dem Köln-Vortrag gab Minkowski eine Darstellung der SRT, die sich von der Einsteinschen Version aus dem Jahr 1905 abgrenzte und die mathematische Herangehensweise in den Vordergrund stellte. Es ist interessant zu sehen, wie Minkowski versuchte, in seinem Vortrag besonders die Arbeiten von Poincaré zu verschweigen<sup>16</sup>.

In der Folge dieses Vortrages reagierten verschiedene namhafte Mathematiker und Physiker auf Minkowskis Darstellung. Vor allem Sommerfeld und weitere Göttinger Wissenschaftler befürworteten „Minkowskis Theorie“ und trugen zu deren Verbreitung bei. Während Minkowskis Version vor allem auf die Göttinger Mathematiker Einfluss hatte gab Sommerfeld 1910 in den *Annalen der Physik* eine alternative, aber gleichwertige Darstellung ab, die auf Poincaré zurückgeht und in den Umgang mit Vierer- und Sechservektoren einwies<sup>17</sup>. Diese Darstellung sprach vor allem die Physiker an und in der Folge wurde diese Herangehensweise von vielen Physikern adaptiert. Mit dem durch Max Planck angeregten Lehrbuch von Max Laue<sup>18</sup> (1911), dem ersten Lehrbuch über die spezielle Relativitätstheorie, erhielt ein breiterer Kreis von Wissenschaftlern und Studenten die Möglichkeit sich leicht die mathematischen Grundkenntnisse der vierdimensionalen Vektoranalysis anzueignen um die Elektrodynamik relativistisch zu behandeln. Laue verwendete in weiten Teilen Sommerfelds Methode der Vektoranalysis. Einstein stand anfänglich der Minkowskischen Formulierung der SRT kritisch gegenüber<sup>19</sup>. Er empfand sie als unnötig kompliziert und war erst im Sommer 1912 bereit, die vierdimensionale Formulierung zu übernehmen.

Gustav Mie benutzte in seiner Theorie der Materie oft Sätze und Formulierungen, bei denen er auf einen Beweis verzichtet. Stattdessen verwies er auf die entsprechende Ausarbeitung in Max Laues Lehrbuch. Da diese Schreibweise heute unüblich ist, werden im Folgenden einige elementare Definitionen aus Laues

---

<sup>15</sup> Dazu siehe [Walter 1999, S. 49].

<sup>16</sup> Mehr dazu findet sich in [Walter 1999, Seite 56-58].

<sup>17</sup> [Sommerfeld 1910a] und [Sommerfeld 1910b].

<sup>18</sup> Max Laue: *Das Relativitätsprinzip* [Laue 1911], siehe auch [Treder 1975, S. 31] und [Hentschel 1990, S.11, 23-24].

<sup>19</sup> Siehe dazu [Walter 1999, S. 49 und 69ff] sowie [Renn, Sauer 1999, S. 91].

Lehrbuch angeführt.

### 1.3.2 Vierervektoren

Die Definition eines Vierervektors wurde von Laue wie folgt vorgenommen: Ausgehend von einem Bezugssystem  $X = (x, y, z, ct)$ , in dem die physikalischen Gesetze in ihrer einfachsten Form gelten, erhält man mit einer allgemeinen Lorentztransformation ein weiteres Bezugssystem  $X' = (x', y', z', ct')$ . Dabei bleibt der Ausdruck  $s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2t'^2$  invariant. Diese Transformation lässt sich in Matrix-Schreibweise<sup>20</sup> darstellen:  $X' = \Lambda X$ . Jede aus vier Komponenten bestehende *physikalische Größe*, die sich mit der gleichen Transformationsmatrix  $\Lambda$  der Koordinaten transformiert, ist dann ein Vierervektor. Charakterisiert man zum Beispiel in dem ungestrichenen System mit vier Größen den dreidimensionalen Impuls sowie die kinetische Energie eines Teilchens und fasst diese Größen zu einem Vektor zusammen, so erhält man einen Vierervektor. Denn wenn dieser Vektor entsprechend der obigen Matrix transformiert wird, so erhält man vier neue Werte, die dem Impuls und der Energie des Teilchens im gestrichenen Bezugssystem entsprechen. Impuls und Energie bilden zusammen folglich einen Vierervektor. Einen weiteren Vierervektor bildet noch die Stromdichte  $\mathbf{v}$  mit der Ladungsdichte  $\rho$ .

### 1.3.3 Sechservektoren

Bildet man von der Transformationsmatrix der Koordinaten die 16 Unterdeterminanten und von diesen wieder je 9 Unterdeterminanten, so erhält man 144 Koeffizienten, von denen 36 in einer Matrix der Dimension 6 zusammengefasst werden. Diese Matrix gibt nun eine weitere Transformation an, nach der sich die sogenannten Sechservektoren  $(\mathfrak{F}_{xl}, \mathfrak{F}_{yl}, \mathfrak{F}_{zl}, \mathfrak{F}_{xy}, \mathfrak{F}_{yz}, \mathfrak{F}_{zx})$  transformieren<sup>21</sup>.

Betrachtet man die Definition der Sechservektoren genauer, so stellt man fest, dass sie nichts anderes sind, als antisymmetrische Tensoren 2. Stufe. Sie haben die Eigenschaft  $\mathfrak{F}_{jk} = -\mathfrak{F}_{kj}$  für  $j, k = x, y, z, l$  und Komponenten mit zwei gleichen Indizes werden nach Laue der Form wegen Null gesetzt.

Als Beispiel für einen Sechservektor in der Physik sei der Faradaytensor genannt, hier werden unter  $F$  das elektrische und das magnetische Feld zusammengefasst<sup>22</sup>:

---

<sup>20</sup> Das  $\Lambda$  steht so nicht bei Laue, er gibt explizit die Koeffizienten dieser Matrix an. Diese spielen hier jedoch keine Rolle, es sollte nur das Prinzip angedeutet werden.

<sup>21</sup> Auch hier wird diese Definition nur angedeutet, die genaue Definition kann man bei Laue nachlesen, sie spielt hier keine Rolle. Allgemein sei angemerkt, dass Laue nicht auf entsprechende Literatur in der Mathematik verweist, sondern auf andere Physiker.

<sup>22</sup> Je nach dem die Zeit als erste oder vierte Dimension aufgefasst wird, ändert sich die Reihenfolge der Einträge. Hier unterscheiden sich die Arbeiten aus den ersten Jahren nach Laues Lehrbuch noch.

$$F = (B_x, B_y, B_z, -E_z, -E_x, -E_y).$$

### 1.3.4 Rechenoperationen, Invarianten und Differenzialoperationen nach Laue

**Rechenoperationen und Invarianten:** Weil das Rechnen mit Vierer- und Sechservektoren heute unüblich ist, folgt eine Auflistung der elementaren Rechenoperationen in der Notation, die Laue und damit auch Gustav Mie häufig verwenden. Hier bedeuten  $x, y$  und  $z$  die drei Raumkomponenten und  $l = iu = ict$  die Zeitkomponente, wobei Mie, wie fast jeder theoretische Physiker, die Lichtgeschwindigkeit zu  $c = 1$  setzt<sup>23</sup>:

1. Skalarprodukt von zwei Vierervektoren  $P, \Phi$ :  
 $(P\Phi) = P_x\Phi_x + P_y\Phi_y + P_z\Phi_z + P_l\Phi_l.$
2. Skalarprodukt von zwei Sechservektoren:  $\mathfrak{F}, \mathfrak{G}$   
 $(\mathfrak{F}\mathfrak{G}) = \mathfrak{F}_{xl}\mathfrak{G}_{xl} + \mathfrak{F}_{yl}\mathfrak{G}_{yl} + \mathfrak{F}_{zl}\mathfrak{G}_{zl} + \mathfrak{F}_{yz}\mathfrak{G}_{yz} + \mathfrak{F}_{zx}\mathfrak{G}_{zx} + \mathfrak{F}_{xy}\mathfrak{G}_{xy}.$
3. Addition und Subtraktion werden jeweils komponentenweise durchgeführt.
4. Ein Vektorprodukt aus zwei Vierervektoren  $P, \Phi$  gibt einen Sechsektor  $\mathfrak{B} = [P\Phi]$  mit den Komponenten  
 $\mathfrak{B}_{jk} = P_j\Phi_k - P_k\Phi_j$  für  $j, k = x, y, z, l$ . Hier gilt  $[P\Phi] = -[\Phi P]$ .
5. Ein Vektorprodukt aus einem Vierervektor  $P$  und einem Sechsektor  $\mathfrak{F}$  gibt einen Vierervektor  $[P\mathfrak{F}]$  mit den Komponenten  
 $[P\mathfrak{F}]_k = P_x\mathfrak{F}_{kx} + P_y\mathfrak{F}_{ky} + P_z\mathfrak{F}_{kz} + P_l\mathfrak{F}_{kl}$  für  $k = x, y, z, l$ .

Das spezielle Relativitätsprinzip bedeutet in der Schreibweise nach Laues Lehrbuch<sup>24</sup>, dass man physikalische Gesetze in Gleichungen mit Hilfe von Lorentz-invarianten, Vierer- und Sechservektoren darstellen kann, wobei die *Form der Gleichungen* durch Lorentztransformationen nicht verändert werden darf. In einer solchen Schreibweise lauten die physikalischen Gesetze in jedem von einem Inertialsystem aus durch Lorentztransformationen erreichbaren Bezugssystem gleich. Als Invarianten bezüglich Lorentztransformationen stehen jeweils die Skalarprodukte und die Absolutbeträge von Vierer- und Sechservektoren und ein paar Spezialfälle zur Verfügung.

**Differenzialoperatoren** In der Physik, und besonders in der Elektrodynamik, spielen Differenzialoperatoren eine wichtige Rolle. Wie Sommerfeld und Laue zeigen, lassen sich die bekannten Anwendungen der Operatoren grad, div und rot

<sup>23</sup> [Mie 1912b, S.1]

<sup>24</sup> [Laue 1911]

der dreidimensionalen Vektoranalysis leicht auf die vierdimensionale Vektoranalysis ausdehnen. Dabei muss man unterscheiden, ob man den vierdimensionalen Operator  $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}, \frac{\partial}{\partial t})$  auf einen Skalar  $\varphi$ , einen Vierervektor  $P$  oder auf einen Sechservektor  $\mathfrak{F}$  anwendet. Die vier wichtigsten Kombinationen sind hier in der Notation von Laue wiedergeben:

- Für skalare Funktionen  $\varphi = \varphi(x, y, z, t)$  ist  $\Gamma_{\rho\alpha\delta} \varphi = (\frac{\partial\varphi}{\partial x}, \frac{\partial\varphi}{\partial y}, \frac{\partial\varphi}{\partial z}, \frac{\partial\varphi}{\partial t})$ , der Gradient von  $\varphi$  ein Vierervektor.
- Aus dem Vierervektor  $P$  erhält man das Skalarprodukt  $(\nabla P) = Div P = \frac{\partial P_x}{\partial x} + \frac{\partial P_y}{\partial y} + \frac{\partial P_z}{\partial z} + \frac{\partial P_t}{\partial t}$ .
- Weiter erhält man aus  $P$  über das Vektorprodukt den Sechservektor  $[\nabla P] = \mathfrak{Rot} P$  mit  $\mathfrak{Rot}_{jk} P = \frac{\partial P_k}{\partial j} - \frac{\partial P_j}{\partial k}$ .
- Es bleibt dann noch das Vektorprodukt von  $\nabla$  mit einem Sechservektor  $\mathfrak{F}$ : Man erhält so einen Vierervektor  $[\nabla \mathfrak{F}] = \Delta \iota \mathfrak{F}$  mit den Komponenten  $\Delta \iota \mathfrak{F}_k = \frac{\partial \mathfrak{F}_{kx}}{\partial x} + \frac{\partial \mathfrak{F}_{ky}}{\partial y} + \frac{\partial \mathfrak{F}_{kz}}{\partial z} + \frac{\partial \mathfrak{F}_{kt}}{\partial t}$ .

Diese Ausdrücke sind sämtlich lorentzinvariant und erlauben es, die Maxwellsche Elektrodynamik leicht in die vierdimensionale Formulierung zu übertragen. Im Folgenden werden zwei Beispiele zur Illustration vorgeführt:

Das Gesetz der Ladungserhaltung  $div \mathbf{v} - d\rho/dt = d\mathbf{v}_x/dx + d\mathbf{v}_y/dy + d\mathbf{v}_z/dz - d\rho/dt = 0$  wird mittels der vierdimensionalen Divergenz ausgedrückt:

$$Div(\mathbf{v}, i\rho) = 0.$$

Hierbei werden die Ladungsdichte  $\rho$  und die dreidimensionale Stromdichte  $\mathbf{v}$  zu dem Vierervektor  $(\mathbf{v}, i\rho)$  zusammengefasst.

In  $\Delta \iota \mathfrak{F}(\mathfrak{E}, i\mathfrak{B}) = 0$  stecken die vier Gleichungen

$$\begin{aligned} 0 &= \Delta \iota \mathfrak{F}_x(\mathfrak{E}, i\mathfrak{B}) = \partial_x 0 + \partial_y \mathfrak{E}_z - \partial_z \mathfrak{E}_y + \partial_t i\mathfrak{B}_x = \partial_y \mathfrak{E}_z - \partial_z \mathfrak{E}_y + \partial_t \mathfrak{B}_x = rot_x \mathfrak{E} + \partial_t \mathfrak{B}_x \\ 0 &= \Delta \iota \mathfrak{F}_y(\mathfrak{E}, i\mathfrak{B}) = -\partial_x \mathfrak{E}_z + \partial_y 0 + \partial_z \mathfrak{E}_x + \partial_t i\mathfrak{B}_y = \partial_z \mathfrak{E}_x - \partial_x \mathfrak{E}_z + \partial_t \mathfrak{B}_y = rot_y \mathfrak{E} + \partial_t \mathfrak{B}_y \\ 0 &= \Delta \iota \mathfrak{F}_z(\mathfrak{E}, i\mathfrak{B}) = \partial_x \mathfrak{E}_y - \partial_y \mathfrak{E}_x + \partial_z 0 + \partial_t i\mathfrak{B}_z = \partial_x \mathfrak{E}_y - \partial_y \mathfrak{E}_x + \partial_t \mathfrak{B}_z = rot_z \mathfrak{E} + \partial_t \mathfrak{B}_z \\ 0 &= \Delta \iota \mathfrak{F}_t(\mathfrak{E}, i\mathfrak{B}) = -i(\partial_x \mathfrak{B}_x + \partial_y \mathfrak{B}_y + \partial_z \mathfrak{B}_z) + \partial_t 0 = -i div \mathfrak{B} = 0. \end{aligned}$$

Man betrachtet nun die erste und die letzte Spalte: Die vierte Zeile entspricht der Gleichung  $div \mathfrak{B} = 0$  in dreidimensionaler Notation und die ersten drei Zeilen bilden die Komponenten der Gleichung  $rot \mathfrak{E} + d\mathfrak{B}/dt = 0$ , also das Faradaysche Induktionsgesetz. Die größte Verwirrung tritt bei der Zuordnung der Vorzeichen und Komponenten der  $\mathfrak{E}$ - und  $\mathfrak{B}$ -Felder auf, man sollte „vorsichtig“ rechnen.

Zu Beginn des mathematischen Teils der Entwurf-Theorie<sup>25</sup> gibt Marcel Grossmann einen kurzen Rückblick über die Grundlagen der „Entwicklung der Vektoranalysis eines Gravitationsfeldes“, geschaffen von Christoffel, Ricci und Levi-Civita. Dort schreibt er über die Beziehung zur eben angedeuteten Analysis in der SRT:

„Da aber die Vektoranalysis des auf beliebige krummlinige Koordinaten bezogenen euklidischen Raumes formal identisch ist mit der Vektoranalysis einer beliebigen, durch ihr Linienelement gegebenen Mannigfaltigkeit, so bietet es keine Schwierigkeiten, die vektoranalytischen Begriffsbildungen, wie sie uns in den letzten Jahren von Minkowski, Sommerfeld, Laue u. a. für die Relativitätstheorie entwickelt worden sind, auszudehnen auf die vorstehende allgemeine Theorie von Einstein.“<sup>26</sup>

Grossmann betonte, dass der oben beschriebene Formalismus zum Ricci-Kalkül passt und im Wesentlichen in der ART übernommen werden kann. Offensichtlich versuchte er von seinem dargestellten Formalismus abgeschreckte Physiker von Beginn an zu besänftigen.

---

<sup>25</sup> [Einstein/Grossmann 1913], doch dazu folgt später mehr.

<sup>26</sup> [Einstein/Grossmann 1913, S. 23]





---

## 2 Zu den Grundlagen einer Theorie der Materie

### 2.1 Gustav Mie - Die Biographie

Gustav Mie wurde am 29. September 1868 in Freiburg im Breisgau geboren<sup>27</sup>. Er stammte aus einer religiösen Familie, beide Eltern waren Pfarrerskinder<sup>28</sup>. Er wuchs in Rostock auf und machte dort sein Abitur an der Alten Stadtschule. Als Kind fasste er, obwohl er in seiner Schulzeit von der Mathematik und den Naturwissenschaften fasziniert war, den Vorsatz Theologie zu studieren. Jedoch kam Mie als Oberprimaner zu der Idee Naturforscher und Mathematiker zu werden und begann im Wintersemester 1886/87 das Studium der Mathematik und der Naturwissenschaften in Rostock. Eine Parallele zu Einsteins Jugend wird von Mie (allerdings ohne diesen Bezug) angegeben: Er erinnert sich später, dass er in der Quarta die Geometrie Euklids kennenlernte und dabei sehr viel Freude verspürte und während seiner Schulzeit stets eine Vorliebe für die Naturwissenschaften und Mathematik hatte<sup>29</sup>.

Ein intensives Interesse an der Philosophie wurde in Mie durch jugendliche Zweifel an der Religion geweckt. Er las Schriften von Haeckel und später Schleiermacher. Zu Beginn seines Studiums begann er, sich Immanuel Kants „Kritik der reinen Vernunft“ zu erarbeiten. Die Kantsche Philosophie war für sein geistiges Leben von wesentlicher Bedeutung<sup>30</sup>. In vielen seiner Arbeiten, besonders den populäreren Arbeiten sowie im Briefwechsel mit Einstein wird Mies Interesse an der Philosophie und an deren Beziehung zur Physik und Natur deutlich.

Im Frühjahr 1888 wechselte Gustav Mie nach Heidelberg und wurde Schüler von Leopold Königsberger. Dort betreute er als Hilfsassistent unter Rosenbusch die umfangreiche mineralogische Sammlung des Instituts. Trotzdem blieb Mathematik sein Studienschwerpunkt, Physik betrieb er kaum: „es gab in Heidelberg, wie an den meisten Universitäten damals, insbesondere noch keinen eigenen Vertreter der theoretischen Physik“<sup>31</sup>. Trotzdem schloss er im Frühjahr 1891 sein Staatsexamen in Mathematik und Physik ab. Die Kenntnisse in theoretischer Physik eignete er sich dazu autodidaktisch an und arbeitete mehrere Monate ausschließlich an der physikalischen Arbeit des Examens. Für den mathematischen Teil blieben Mie am Ende genau 24 Stunden, die er, bis auf Essenspausen, ganz ausnutzte.

Nur etwa vier Monate später absolvierte Mie das Doktorexamen in Heidelberg

---

<sup>27</sup> Diesem Abschnitt liegen die Quellen [Mie 1948, Autobiographie] sowie [Hönl 1968] und [Kast 1957] zugrunde.

<sup>28</sup> Im [DSB 1975] steht fälschlicher Weise, Mie sei Sohn eines Pastors. Gustav Mie schreibt in seiner Kurzbiographie „Mein Leben“ ausdrücklich, dass sein Vater Kaufmann war.

<sup>29</sup> [Mie 1948, S. 734]

<sup>30</sup> [Mie 1948, S. 735]

<sup>31</sup> [Mie 1948, S. 736]

unter Königsberger. Seine Dissertation schrieb er über partielle Differenzialgleichungen. Im Sommer 1892 erhielt Gustav Mie an einer Privatschule eine Stelle als Mathematiklehrer, wurde jedoch schon im Herbst von Otto Lehmann nach Karlsruhe eingeladen, um dort das physikalische Praktikum zu übernehmen und zu habilitieren. Lehmann prüfte Mie ein Jahr zuvor im Physikexamen. Die Betreuung des Praktikums übernahm Mie mit Zögern, da seine bisherigen Studien vor allem auf Mathematik und theoretischer Physik fußten.

In den Jahren in Karlsruhe konnte Mie vor allem seine experimentellen Fähigkeiten schulen. Neben den Experimenten zur Vorlesung und im Praktikum stellte Mie die berühmten Experimente von Heinrich Hertz nach, die ein paar Jahre zuvor mit den selben Apparaten in Karlsruhe durchgeführt worden waren. Im Sommer 1897 habilitierte Gustav Mie und war mittlerweile mit der Maxwellschen Theorie bestens vertraut, er beschäftigte sich weiterhin vor allem mit theoretischer Physik.

1901 heiratete er und folgte im Frühjahr 1902 einem Ruf nach Greifswald als außerordentlicher Professor für theoretische Physik. Hierzu schrieb Mie:

„Obwohl ich nun eigentlich Theoretiker war, so wurde ich doch, wie es damals in Greifswald üblich war, als sein Nachfolger<sup>32</sup> zum Vertreter der Experimentalphysik und zum Direktor des physikalischen Instituts ernannt. Gerade das war nun für meine weitere Entwicklung von besonderer Bedeutung. Soviel ich selber über mich urteilen kann, ist es mein Beruf geworden, die Verbindung zwischen theoretischer und experimenteller Physik herzustellen, welche gerade damals in der Gefahr standen, sich immer mehr zu trennen.“<sup>33</sup>

Die Strukturierung der physikalischen Lehrstühle war zu dieser Zeit in einer Umbruchphase. Seit etwa den 1870er Jahren entstanden Stellen für jüngere Physiker, die den wachsenden Studierendenzahlen eine systematischere theoretische Ausbildung verschaffen sollten. Jedoch wurden diese Stellen überwiegend als Vorstufe zum Erwerb eines Lehrstuhls für experimentelle Physik angesehen. In Greifswald gab es wohl erst frühestens ab 1884 eine solche Stelle.<sup>34</sup> Erst deutlich später konnte man von theoretischer Physik als eigenständigem Fach sprechen.

Die Greifswalder Zeit war Gustav Mies produktivste Zeit, in der er unter anderem 1908 die Arbeit über die Optik trüber Lösungen, 1910 ein Lehrbuch der Elektrizität sowie 1912 und 1913 die „Theorie der Materie“ veröffentlichte. Die Arbeit von 1908 fußt auf einer strengen Lösung der Maxwellschen Differenzialgleichungen und ermöglicht an Hand von Farbeffekten auf Grund assymetrischer

---

<sup>32</sup> Der Vorgänger war Walther König, er ging jedoch 1905 nach Gießen.

<sup>33</sup> [Mie 1948, S. 738-739]

<sup>34</sup> Siehe z.B. [Jungnickel et al 1986, Kapitel 15], und hier besonders S. 41.

Beugungserscheinungen, den sogenannte „Mie-Effekt“, auf die Größe der gelösten Moleküle zu schließen. Dieser Effekt wird ebenso ausgenutzt, um in der Astronomie interstellare Materie zu untersuchen.

Das Lehrbuch von 1910 kam ursprünglich fast ohne mathematische Symbole aus. Gustav Mie wollte zeigen, dass die Maxwellschen Differenzialgleichungen nichts anderes sind, als kompakt geschriebene Umformungen von experimentell gefundenen Gesetzen. Mie erkannte, dass diese Beschreibung unbrauchbar war und erstellte 1940 eine zweite, umgearbeitete Auflage, in der nun auch die mathematischen Formeln einzogen. Dieses Buch war unter seinen Kollegen angesehen, wurde vielfach von Studenten gelesen und erschien in mehrfachen Auflagen und verschiedenen Übersetzungen.

Die Theorie der Materie gilt als einer der ersten Versuche, Elektromagnetismus und Gravitation im Rahmen einer Theorie zu beschreiben und diente als erste nichtlineare Elektrodynamik zur Vorlage späterer Theorien von Max Born und Leopold Infeld. Sie wird in einem späteren Kapitel dieser Arbeit näher besprochen.

Insgesamt war Gustav Mie 15 Jahre in Greifswald. In dieser Zeit lernte er auch Wilhelm Wien kennen, den er in seiner Biographie stets „Willi“ nennt. Mit seinem Freund Wien und etwa einem Dutzend anderer Physiker (darunter Max von Laue, Arnold Sommerfeld und Peter Debye) traf sich Mie bis zum Beginn des ersten Weltkrieges jährlich zu einem Winterurlaub im Mittenwald. 1917 folgte Mie einem Ruf nach Halle. Die ersten Jahre in Halle waren geprägt von Weltkrieg, Revolution, einem Jahr kommunistischer Herrschaft und anschließender militärischer Besatzung. In dieser Zeit beteiligte sich Mie an der Diskussion um die Allgemeine Relativitätstheorie von Albert Einstein mit Vorträgen, Artikeln und in einem interessanten Briefwechsel mit Einstein.

1924 folgte Mie einem Ruf nach Freiburg im Breisgau, wo er unter anderem mit Staudinger Experimente an Röntgenstrahlung durchführte. Mie wurde 1935 emeritiert und verstarb am 13. Februar 1957 in Freiburg.

Gustav Mie erhielt die Ehrendoktorwürde durch die Technische Hochschule in Karlsruhe sowie die Goethe-Medaille des Frankfurter Hochstifts und war Ehrenmitglied der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

## 2.2 Das Ziel der Theorie der Materie

Gustav Mie veröffentlichte die „Grundlagen einer Theorie der Materie“ 1912 und 1913 in drei Teilen in den Annalen der Physik. In der Einleitung motivierte er seine Arbeit durch die Erkenntnis, dass die Gesetze der Mechanik sowie die Maxwellschen Gleichungen nicht im Inneren der Materie gelten können. Vor allem die ersten Schritte der Quantenphysik zeigten das Versagen der bisherigen Physik auf, ein Problem dieser Zeit sei es „die Fülle der merkwürdigen Tatsachen

[...nicht] von einem Standpunkte aus zusammen überblicken“<sup>35</sup> zu können. Dass auch Mie diesen Makel nicht ändern konnte zeigt schon die Wahl des Wortes „Grundlagen“ im Titel seiner Arbeit.

Das eigentliche Ziel von Mie war es, diejenigen Gleichungen zu finden, denen die Gesetze im Innern der Materie genügen, was ihm nicht gelungen ist:

„Ich habe im folgenden mit dieser Arbeit einen Anfang zu machen versucht, aber man darf bei der Schwierigkeit des Gegenstandes nicht erwarten, daß sich gleich experimentell greifbare Resultate ergeben.“<sup>36</sup>

Mie begnügte sich nun damit, neue Grundlagen zu schaffen, auf denen zukünftige Theorien aufbauen könnten und stellte sich als Minimalziel:

- die Existenz des unteilbaren Elektrons zu beweisen und
- den notwendigen Zusammenhang zwischen Gravitation und der Existenz der Materie aufzuzeigen.

Diese Ziele waren, wie im vorigen Kapitel dargestellt wurde, die Hauptziele des elektromagnetischen Feldprogramms gewesen. Die interessanten Aspekte dieser Theorie für die spätere Entwicklung sind jedoch die Herleitung der Maxwell-Gleichungen aus dem Hamiltonprinzip, sowie die Rolle der Gravitation innerhalb der Theorie. Auf diese beiden Punkte wird im Folgenden besonderer Wert gelegt.

## 2.3 Annahmen und Feldgleichungen der Materietheorie

### 2.3.1 Mies heuristische Grundlagen

An den Beginn seiner Abhandlung stellte Gustav Mie seine Annahmen, allerdings sind diese nicht die einzigen, die er benötigte, um seine Theorie aufzustellen. An entsprechenden Stellen wurden Nebenannahmen wie zum Beispiel das Kausalitätsprinzip, die Energieerhaltung und die Lokalisierbarkeit der Energie eingeführt.

Die Grundannahmen in der Theorie der Materie sind:

---

<sup>35</sup> [Mie 1912a, S. 511]

<sup>36</sup> [Mie 1912a, S. 511]

1. Materie und Äther sind wesensgleich, im Innern der Materie bestehen demnach auch elektrische und magnetische Felder. Die Zustände des Äthers innerhalb der Materie sind jedoch so, dass dort die Maxwellschen Gleichungen nicht mehr gelten.
2. Das Relativitätsprinzip hat allgemeine Gültigkeit.
3. Die Zustände des Äthers, nämlich elektrisches Feld, magnetisches Feld, elektrische Ladung und Ladungsstrom, reichen aus, um die Erscheinungen der materiellen Welt zu beschreiben.

Die ersten beiden Annahmen hielt Mie für außer Zweifel stehend, jedoch ließ er erkennen, dass die dritte Annahme gegebenenfalls zu überdenken und ergänzen sei. Mie behielt sich Änderungen an der dritten Annahme vor, denn im dritten Teil der Theorie der Materie führte der Versuch, die Gravitation zu beschreiben dazu, die Menge der Grundgrößen zu erweitern.

Hier sollte betont werden, dass Mie unter dem Relativitätsprinzip dasjenige aus Einsteins *Elektrodynamik bewegter Körper*<sup>37</sup> verstand, also das spezielle Relativitätsprinzip. Dass Mie hier den Begriff *Äther* verwendete verwundert zunächst, jedoch wird bald klar, dass Mie unter diesem Begriff nichts Substanzielles verstand. Mie verwendete den Begriff Äther als Synonym für Feld oder Raum, und nennt seine Gleichungen einmal Feldgleichungen und auch Äthergleichungen. Mies Ätherbegriff wurde in Abschnitt (1.2.4) näher erläutert.

Zu seinem Modell der Materie kam Mie sogar über das spezielle Relativitätsprinzip, diese Argumentationskette stellte er in dem populärwissenschaftlichen Buch von 1921 dar<sup>38</sup>: Nimmt man materielle Elementarteilchen als starr an, so wäre eine instantane Signalübertragung im Widerspruch zum Relativitätsprinzip möglich, es ergäbe sich die Möglichkeit absolute Gleichzeitigkeit zu definieren. Folglich muss das spezielle Relativitätsprinzip universelle Gültigkeit haben, also auch innerhalb der Materie und im leeren Raum, im Äther gelten. Nach Mie ist das ein Hinweis darauf, dass Materie und Äther wesensgleich sind und zwar nicht im Sinne der atomistischen Denkweise (die ja zum Widerspruch führte), sondern im Sinne des Feldbegriffs. Mie schrieb dem Äther keine materielle Eigenschaften zu, sondern definierte umgekehrt die Materie über den Äther. Demnach erscheinen uns die Stellen als Materie, an denen die Ätherzustände extreme Werte oder Singularitäten, bzw. Knotenstellen aufweisen, also dort, wo die Feldgrößen extrem von den *normalen* Werten des Äthers abweichen.

---

<sup>37</sup> Einstein, Albert: „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ in: *Annalen der Physik* **17** (1905), S. 132-148.

<sup>38</sup> [Mie 1921]

### 2.3.2 Herleitung der Feldgleichungen aus den Prinzipien

Zurück zur Theorie der Materie: Hier wird die Notation der Größen von Mie übernommen. Dementsprechend werden dreidimensionale Größen wie die Stromdichte  $\mathbf{v}$  in kleinen Frakturbuchstaben geschrieben, Sechservektoren  $\mathfrak{F}$  und seine Komponenten  $\mathfrak{E}$  und  $\mathfrak{E}_{xy}$  werden in großen Frakturlettern notiert und Skalare wie die Ladungsdichte  $\varrho$  wie gewohnt. Daraus ergibt sich auch, ob eine zusammengesetzte Größe ein Vierer- oder Sechservektor ist.

Die ersten Feldgleichungen, die Mie wählte, waren die beiden Maxwellgleichungen

$$\Delta\omega(\mathfrak{H}, -i\mathfrak{D}) = (\mathbf{v}, i\varrho) \quad (4)$$

$$\Delta\omega(\mathfrak{E}, i\mathfrak{B}) = 0. \quad (5)$$

Gleichung (4) enthält die beiden Gleichungen  $\operatorname{div}D = \varrho$  (Coulombgesetz in Materie) und  $\operatorname{rot}H - dD/dt = v$  (Biot-Savart-Gesetz im Medium). Das Faradaysche Induktionsgesetz ( $\operatorname{rot}E + dB/dt = 0$ ) und die Nichtexistenz von magnetischen Ladungen ( $\operatorname{div}B = 0$ ) sind in Gleichung (5) enthalten<sup>39</sup>. Auch das Gesetz von der Erhaltung der Ladung

$$\operatorname{Div}(\mathbf{v}, i\varrho) = 0 \quad (6)$$

lässt sich relativistisch formulieren und genügt den Annahmen (1)-(3); es wurde deshalb von Mie zu den Feldgleichungen hinzugefügt. In dreidimensionaler Schreibweise lautet es:  $\operatorname{div} \mathbf{v} = d\varrho/dt$ .

Die Gleichung

$$\mathfrak{Rot}(f, i\varphi) = \mathfrak{F} \quad (7)$$

wurde nach einigen Fallunterscheidungen hinzugefügt, die auf die spezielle Form des Vierervektors auf der rechten Seite führen. Denn bisher stehen lediglich sieben Gleichungen zur Verfügung, die die Zeitableitungen  $dD/dt$ ,  $dB/dt$  und  $d\varrho/dt$  enthalten. Dem Gegenüber stehen jedoch 10 physikalische Größen und das Kausalitätsprinzip wird von Mie nun in der Weise interpretiert, dass drei weitere Zeitableitungen hinzukommen müssen. Der Operator  $\mathfrak{Rot}$  ist nach den Gleichungen (4)-(6) die einzige verbleibende Möglichkeit, weitere Differenzialgleichungen zu erhalten, die die noch fehlenden Zeitableitungen ( $\partial f_i/\partial t$ ) liefern um dem Kausalitätsgesetz zu genügen.

Nach den Fallunterscheidungen ergibt sich weiter, dass  $\mathfrak{F} = (\mathfrak{B}, -\mathfrak{E})$  gilt. In Gleichung (7) stecken die dreidimensionalen Gleichungen  $\operatorname{rot} f = B$  und  $\operatorname{grad} \varphi + df/dt = -E$ , die den Potentialgleichungen entsprechen.

---

<sup>39</sup> In Abschnitt (1.3.4) wurde für die Gleichungen (5) und (6) gezeigt, wie in Laues Formalismus leicht die bekannten Gleichungen der dreidimensionalen Vektoranalysis aufzufinden sind. Zur Erinnerung: hier gilt  $l = iu = ict$ , wobei Mie  $c = 1$  setzt.

Wie Mie betonte, galten die Gleichungen (4)-(7) als die vorläufigen Feldgleichungen einer Theorie der Materie. Es musste noch geprüft werden, ob sie die einzig möglichen waren und es sollte sich später herausstellen, dass die Gravitation hiermit nicht beschrieben werden konnte und so eine Erweiterung dieses Gleichungssystems notwendig wurde.

Durch Hinzunehmen der Gleichung (7) erhielten die Größen  $\varphi$  und  $\mathfrak{f}$  im Gegensatz zu anderen Potentialtheorien eine echte physikalische Bedeutung. Für ruhende oder gleichförmig bewegte Elektronen folgt aus Gleichung (7) die Beziehung  $\nabla\varphi + \mathfrak{E} = 0$ . Dementsprechend deutete Mie diese Gleichung als „Gleichgewichtsbedingung des Feldes in der Umgebung des Elektrons“, da „die beiden Kräfte  $\mathfrak{E}$  und  $\nabla\varphi$  einander entgegengesetzt gleich sein sollen“<sup>40</sup>.  $\nabla\varphi$  wurde als Kohäsionskraft und  $\varphi$  als Kohäsionsdruck gedeutet. Ähnlich erhielt  $\mathfrak{f}$  die Deutung als Bewegungsgröße. Nur im statischen Fall sind diese Ausdrücke identisch mit den Potentialen der üblichen Potentialtheorien.

Mie unterschied physikalische Größen in zwei Klassen, die *Quantitätsgrößen* und die *Intensitätsgrößen*. Diese Unterscheidung wurde von Mie an vielen Stellen seiner Veröffentlichungen betont und kann bis auf Maxwell zurückgeführt werden<sup>41</sup>. Quantitätsgrößen, wie zum Beispiel die elektrische Ladung, Zeitdauer oder Länge einer Strecke sind im Wesentlichen diejenigen Größen, die sich durch additives Hinzufügen von einer bestimmten Einheitsgröße ergeben. Dagegen lassen sich Intensitätsgrößen wie die Kraft nur über eine Messprozedur ermitteln. Der Grund für diese Unterscheidung spielt hier keine Rolle, es ist jedoch im Folgenden wichtig, dieses Konzept von Mie zu beachten, denn es führt zu der Symmetrie in Mies Theorie.<sup>42</sup>

Nun stehen nach Mie den zehn Quantitätsgrößen ( $\mathfrak{D}, \mathfrak{H}, \mathfrak{v}, \varrho$ ) die zehn Intensitätsgrößen ( $\mathfrak{E}, \mathfrak{B}, \mathfrak{f}, \varphi$ ) gegenüber. Nach Annahme (3) reicht jeweils ein Satz dieser Größen aus, um das physikalische Geschehen vollständig zu beschreiben. Die Gleichungen (4)-(7) sind in Übereinstimmung mit dem Kausalitätsprinzip, da 10 Größen in den Zeitableitungen auftreten. Allerdings bestand für Mie nun das Problem, den nichtlinearen funktionalen Zusammenhang zwischen den Intensitätsgrößen und den Quantitätsgrößen zu finden. Dieser Weg führte über die Energie zum Hamiltonprinzip.

<sup>40</sup> [Mie 1912a, S. 518], dort verwies Mie auf Poincaré, der 1905 einen solchen Kohäsionsdruck forderte.

<sup>41</sup> Dazu siehe [Corry 2000, S. 5] und [Hönl 1968].

<sup>42</sup> Die Beziehungen zwischen den Quantitäts- und Intensitätsgrößen sind im gleichen Licht wie die späteren Vertauschungsrelationen der Quantendynamik zu sehen, siehe: [Hönl 1968, S. 498].



## 2.4 Die Energie und das Hamiltonprinzip

### 2.4.1 Vom Energieprinzip zur Weltfunktion

Mie forderte die Energieerhaltung und die Lokalisierbarkeit der Energie.<sup>43</sup> Er benötigte deshalb eine Gleichung der Form

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\operatorname{div}\mathfrak{S} \quad (8)$$

für die Energiedichte  $W$  und den Energiestrom  $\mathfrak{S}$ . Diese Gleichung musste aus den Feldgleichungen (4)-(7) folgen, also multiplizierte Mie die einzelnen Feldgleichungen mit geeigneten Faktoren und addierte die so entstandenen neuen Gleichungen. Die Faktoren selbst waren aus den Grundgrößen zusammengesetzt und wurden so bestimmt, dass auf der rechten Seite der Gleichung eine Divergenz stand:

$$\mathfrak{E} \cdot \frac{\partial \mathfrak{D}}{\partial t} + \mathfrak{H} \cdot \frac{\partial \mathfrak{B}}{\partial t} - \varphi \cdot \frac{\partial \varrho}{\partial t} - \mathfrak{v} \cdot \frac{\partial \mathfrak{f}}{\partial t} = -\operatorname{div}([\mathfrak{E} \cdot \mathfrak{D}] - \varphi \cdot \mathfrak{v}). \quad (9)$$

So folgt für den Energiestrom der Ausdruck  $\mathfrak{S} = [\mathfrak{E} \cdot \mathfrak{D}] - \varphi \cdot \mathfrak{v}$ . Die verbliebenen Terme auf der linken Seite von (9) müssen sich als vollständiges Differenzial von  $W$  schreiben lassen:

$$dW = \mathfrak{E} \cdot d\mathfrak{D} + \mathfrak{H} \cdot d\mathfrak{B} - \varphi \cdot d\varrho - \mathfrak{v} \cdot d\mathfrak{f}.$$

Dieser Ausdruck enthält jedoch sowohl Quantitätsgrößen als auch Intensitätsgrößen und entspricht somit nicht Mies Philosophie. Um diese zwei Arten von Größen zu trennen führte er über den Ansatz

$$W = H + \mathfrak{H} \cdot \mathfrak{B} - \mathfrak{v} \cdot \mathfrak{f} \quad (10)$$

eine „hamiltonsche“ Funktion  $H$  ein. Dieser Ansatz führte für  $H$  zu dem Differenzial

$$dH = \mathfrak{E} \cdot d\mathfrak{D} - \mathfrak{B} \cdot d\mathfrak{H} - \varphi \cdot d\varrho + \mathfrak{f} \cdot d\mathfrak{v}, \quad (11)$$

in dem die Intensitätsgrößen als Funktionen der Quantitätsgrößen stehen.

Nun konnte Mie den wichtigen Schluss ziehen, dass aus dem Energieprinzip der Gleichung (8) die Existenz der hamiltonschen Funktion  $H$  folgt, aus der sich sämtliche Intensitätsgrößen berechnen lassen, denn es gilt:

$$\frac{\partial H}{\partial \mathfrak{D}_x} = \mathfrak{E}_x, \quad \frac{\partial H}{\partial \mathfrak{D}_y} = \mathfrak{E}_y, \quad \frac{\partial H}{\partial \mathfrak{D}_z} = \mathfrak{E}_z, \quad \frac{\partial H}{\partial \varrho} = -\varphi \quad \dots \quad (12)$$

---

<sup>43</sup> Der Abschnitt (2.4) bezieht sich auf [Mie 1912a, S. 521-530].

Ebenso lässt sich aus  $H$  die Energiedichte  $W$  auf Grund von (10) und (12) berechnen:

$$W = H - \frac{\partial H}{\partial \mathfrak{H}} \cdot \mathfrak{H} - \frac{\partial H}{\partial \mathfrak{v}} \cdot \mathfrak{v}.$$

Schließlich lässt sich die Annahme des Relativitätsprinzips auf Grund der Form der Gleichungen vereinfachen, wenn man lediglich fordert, dass  $H$  eine Lorentz-invariante ist. Daraus folgen sofort die Lorentzinvarianz für die Feldgleichungen und sämtliche physikalischen Vorgänge, was für Mie eine enorme Vereinfachung darstellt.

Mit dem alternativen Ansatz

$$\Phi(\mathfrak{E}, \mathfrak{B}, \varphi, \mathfrak{f}) = H - (\mathfrak{E} \cdot \mathfrak{D} - \mathfrak{B} \cdot \mathfrak{H}) + (\varphi \cdot \varrho - \mathfrak{f} \cdot \mathfrak{v}) \quad (13)$$

erhält man

$$d\Phi = -\mathfrak{D} \cdot d\mathfrak{E} + \mathfrak{H} \cdot d\mathfrak{B} + \varrho \cdot d\varphi - \mathfrak{v} \cdot d\mathfrak{f}. \quad (14)$$

Für die Funktion  $\Phi$ , die Mie Weltfunktion nannte, gelten die selben Überlegungen wie für die Hamiltonfunktion  $H$ , nur dass man hier die Quantitätsgrößen als Funktionen der Intensitätsgrößen aus  $\Phi$  ableiten kann:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \mathfrak{E}_x} = -\mathfrak{D}_x, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \mathfrak{E}_y} = -\mathfrak{D}_y, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \mathfrak{E}_z} = -\mathfrak{D}_z, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} = \varrho \quad \dots \quad (15)$$

Mit diesen Überlegungen ist das Problem der Materie darauf zurückgeführt, entweder die Weltfunktion  $\Phi$  oder die Hamiltonfunktion  $H$  aufzufinden.

### 2.4.2 Alternativer Ansatz: Das Hamiltonprinzip liefert die Feldgleichungen

Bisher stellte Mie die Zusammenhänge der Welt- bzw. Hamiltonfunktion mit den Feldgleichungen bezüglich des Relativitätsprinzips dar, allerdings hielt er die Frage offen, ob die Form der Feldgleichungen die einzig mögliche ist<sup>44</sup>. Als Indiz für die Richtigkeit seiner Wahl führte Mie das Argument an, dass sich die Feldgleichungen aus dem Hamiltonschen Prinzip ableiten lassen, wenn man zusätzlich voraussetzt, dass  $(\mathfrak{D}, \mathfrak{H}, \varrho, \mathfrak{v})$  ausreichen, um den Äther zu charakterisieren und  $\varrho = \text{div } \mathfrak{D}$  sowie  $\mathfrak{v} = \text{rot } \mathfrak{H} - d\mathfrak{D}/dt$  gilt. Mie formulierte das Hamilton-Prinzip wie folgt:

„Das Hamiltonsche Prinzip. Es gibt eine Funktion  $H(\mathfrak{D}, \mathfrak{H}, \varrho, \mathfrak{v})$ , deren Integral über irgendein bestimmt begrenztes Raum-Zeitgebiet bei allen wirklichen Vorgängen ein Maximum ist, wenn man die

<sup>44</sup> [Mie 1912a, S. 526]

Zustandsgrößen in allen Punkten im Innern des Gebietes variiert, auf der Begrenzung des Gebietes aber nicht.

$$\int_G \delta H(\mathfrak{D}, \mathfrak{H}, \varrho, \mathfrak{v}) \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt = 0.$$

Auf der Begrenzung des Gebietes  $G$  gilt:

$$\delta \mathfrak{D} = \delta \mathfrak{H} = \delta \varrho = \delta \mathfrak{v} = 0.^{45}$$

Ist  $H$  eine Lorentzinvariante, d.h.  $H = H'$ , so ist folglich auch das Integral von  $H$  über entsprechende Raum-Zeitgebiete identisch:

$$\int_G H dx dy dz dt = \int_{G'} H' dx' dy' dz' dt'.$$

Somit gilt das Hamiltonprinzip auch nach einer Lorentztransformation, wenn es schon für  $H$  gilt und die aus dem Hamiltonprinzip abgeleiteten Funktionen erfüllen ebenfalls das Relativitätsprinzip.

Mit (12) gilt dann für die Variation für  $H$ :

$$\delta H = \mathfrak{E} \cdot \delta \mathfrak{D} - \mathfrak{B} \cdot \delta \mathfrak{H} - \varrho \cdot \delta \varphi + \mathfrak{f} \cdot \delta \mathfrak{v}.$$

Schließlich werden die beiden letzten Terme dieser Gleichung nach der folgenden Nebenrechnung ersetzt:

$$\begin{aligned} Div[P \cdot \mathfrak{F}] &:= Div[(\mathfrak{f}, i\varphi) \cdot (\mathfrak{H}, -i\mathfrak{D})] \\ &= div\{[\mathfrak{f} \cdot \mathfrak{H}] + \varphi \cdot \mathfrak{D}\} + \frac{\partial(\mathfrak{f} \cdot \mathfrak{D})}{\partial t} \\ &= \mathfrak{H} \cdot rot \mathfrak{f} - \mathfrak{f} \cdot rot \mathfrak{H} + \mathfrak{D} \cdot \nabla \varphi + \varphi div \mathfrak{D} + \mathfrak{D} \cdot \frac{\partial \mathfrak{f}}{\partial t} + \mathfrak{f} \cdot \frac{\partial \mathfrak{D}}{\partial t} \\ &= \mathfrak{H} \cdot rot \mathfrak{f} + \mathfrak{D} \left( \nabla \varphi + \frac{\partial \mathfrak{f}}{\partial t} \right) - \mathfrak{f} \left( rot \mathfrak{H} - \frac{\partial \mathfrak{D}}{\partial t} \right) + \varphi div \mathfrak{D} \\ &= \mathfrak{H} \cdot rot \mathfrak{f} + \mathfrak{D} \left( \nabla \varphi + \frac{\partial \mathfrak{f}}{\partial t} \right) - \mathfrak{f} \cdot \mathfrak{v} + \varphi \cdot \varrho. \end{aligned}$$

Das Integral über  $Div[P \cdot \delta \mathfrak{F}]$  muss wegen der Annahme im Hamiltonprinzip verschwinden, da dieses Raumintegral nach dem Gaußschen Satz identisch mit dem Integral über die Oberfläche ist, auf der allerdings die Variationen null sind und damit  $\delta \mathfrak{F}$  verschwindet. Es folgt somit:

$$\int_G \delta H dx dy dz dt = \int_G \left( \left( \mathfrak{E} + \nabla \varphi + \frac{\partial \mathfrak{f}}{\partial t} \right) \cdot \delta \mathfrak{D} + (rot \mathfrak{f} - \mathfrak{B}) \cdot \delta \mathfrak{H} \right) \cdot dx dy dz dt = 0.$$

---

<sup>45</sup> Siehe [Mie 1912a, S. 526-527], bisher konnte ich nicht ausmachen, ob hier zum ersten mal ein Wirkungsintegral, bei dem die elektromagnetischen Feldgrößen variiert werden, aufgestellt wurde.

Da  $\mathfrak{D}$  und  $\mathfrak{H}$  unabhängig voneinander variieren, gelten die beiden Gleichungen

$$\mathfrak{E} + \nabla\varphi + \frac{\partial\mathfrak{f}}{\partial t} = 0 \quad \text{und}$$

$$\text{rot}\mathfrak{f} - \mathfrak{b} = 0$$

unabhängig voneinander. Wendet man auf die erste dieser beiden Gleichungen den Operator *rot* an und differenziert die zweite nach der Zeit, so erhält man aus beiden noch die Gleichung

$$\frac{\partial\mathfrak{B}}{\partial t} + \text{rot}\mathfrak{E} = 0.$$

Mit den angenommenen Bedingungen für  $\varrho$  und  $\mathfrak{v}$  hat man so die Feldgleichungen (4) bis (7) aus dem Hamiltonprinzip erhalten.

Es stellt sich die Frage, ob hier zum ersten Mal ein Wirkungsintegral aufgestellt wurde, bei dem die Feldgrößen variiert wurden. Leider kann ich diese Frage nur mit Zögern bejahen: Einige Zeichen deuten darauf hin. Zum Beispiel wird in Vizgins Buch über elektromagnetische Feldtheorien<sup>46</sup> diese Behandlung der Felder durch Mie hervorgehoben und aus Zitaten von Born<sup>47</sup> kann man erkennen, dass zumindest für ihn und Hilbert diese Anwendung der Variationsmethode auf Mie zurückzuführen ist. Bei Weyl und Pauli steht dies ebenfalls im Vordergrund, wobei hier beachtet werden sollte, dass deren Informationen auf Hilberts Darstellung beruhen. Auf der anderen Seite kann man nicht allein aus der Tatsache, keine frühere Anwendung in diesem Sinne gefunden zu haben, darauf schließen, dass Mie dies zuerst durchführte.

## 2.5 Die Gravitation im Rahmen der Theorie der Materie

Das bisherige System der Feldgleichungen und die Grundgrößen reichen nicht aus, um die Gravitationswirkungen zu beschreiben. Folglich muss das System der Grundgrößen ( $\mathfrak{H}$ ,  $\mathfrak{D}$ ,  $\varrho$ ,  $\mathfrak{v}$ ) erweitert werden. Mie deutete an, dass er zuerst einen anderen Weg suchte, die Gravitation zu beschreiben:

„Das nächstliegende wäre, die Gravitation aufzufassen als eine der Energie an sich innewohnende Kohäsionswirkung.“<sup>48</sup>

---

<sup>46</sup> [Vizgin 1989]

<sup>47</sup> 1914 schrieb Born: „Mie hat diesen Gedanken wohl in der allgemeinsten und elegantesten Weise durchgeführt, die sich auf dem Boden der heutigen, aus Langrange’s analytischer Mechanik gebotenen Physik denken läßt“ [Born 1914, S. 23] und 20 Jahre später schrieb er: „Mie first showed the possibility of the generalization of Maxwell’s theory through the choice of  $L$  as an arbitrary function of the  $f_{kl}$ “ [Born 1934, S. 426]. Hier gehe ich davon aus, dass Hilbert Born inzwischen darauf aufmerksam gemacht hätte, wenn er von einer früheren Herleitung Kenntnis bekommen hätte.

<sup>48</sup> [Mie 1913, S. 25]

Jedoch schaffte er es nicht, diesen Ansatz mit dem Kausalitätsprinzip und dem Relativitätsprinzip zu vereinen, allerdings konnte er auch nicht nachweisen, dass dieser Weg nicht möglich ist:

„Ich habe mich lange mit solchen Versuchen, die immer zu recht umständlichen Gleichungssystemen führen, abgemüht und ich bin überzeugt, daß es auf diese Weise ganz unmöglich ist, eine Theorie der Gravitation zu gewinnen, die sowohl dem Relativitätsprinzip, als auch dem Energieprinzip gehorcht.“<sup>49</sup>

Stattdessen wählte er die Hamiltonfunktion  $H$  als Ausgangsgröße auf dem Weg zu seiner Gravitationstheorie. Damit Relativitäts- und Kausalitätsprinzip erfüllt sind, muss sich die Hamiltonfunktion entsprechend mit Vierer- und Sechervektoren verknüpfen lassen und die zusätzlichen Zeitableitungen enthalten:  $H$  ist eine skalare Größe und kann als Divergenz eines Vierervektors in die Grundgleichungen eingehen oder  $H$  kann einen Vierervektor liefern, indem man den Gradienten von  $H$  bildet. Weil ein Sechservektor und ein Skalar nicht durch einen vierdimensionalen Differenzialoperator erster Ordnung verknüpft werden können schloss Mie:

„Das Gravitationsfeld muß notwendigerweise durch einen Vierervektor dargestellt werden, nicht durch einen Sechservektor.“<sup>50</sup>

Die beiden Systeme der Grundgrößen wurden von Mie jeweils um einen Vierervektor und ein Skalar erweitert, so dass nun entweder die Intensitätsgrößen<sup>51</sup>  $(\mathfrak{b}, -i\epsilon)$ ,  $(\mathfrak{f}, i\varphi)$ ,  $(\mathfrak{k}, iw)$ ,  $H_g$  oder die Quantitätsgrößen  $(\mathfrak{h}, -i\vartheta)$ ,  $(\mathfrak{b}, i\varrho)$ ,  $(\mathfrak{g}, iu)$ ,  $\omega$  ausreichten, um die Vorgänge der materiellen Welt vollständig zu beschreiben. Die möglichen vierdimensionalen Differenzialoperatoren liefern die Gleichungen:

$$\mathfrak{g}_x = \frac{\partial \omega}{\partial x}, \quad \mathfrak{g}_y = \frac{\partial \omega}{\partial y}, \quad \mathfrak{g}_z = \frac{\partial \omega}{\partial z}, \quad u = -\frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \mathfrak{k}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathfrak{k}_y}{\partial y} + \frac{\partial \mathfrak{k}_z}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial t} = -\gamma \cdot H_g. \quad (17)$$

$\gamma$  ist dabei eine Universalkonstante, deren Einführung hier unklar bleibt. Die erste Gleichung lässt sich auch schreiben als:

$$\frac{\partial \mathfrak{g}_x}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial \mathfrak{g}_y}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial \mathfrak{g}_z}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (18)$$

---

<sup>49</sup> [Mie 1913, S. 26]

<sup>50</sup> [Mie 1913, S. 26]

<sup>51</sup> Hier schreibe ich für die Größe der Gravitation  $H_g$ , Mie schrieb dagegen  $H$ , doch so sind Verwechslungen mit der Hamiltonfunktion nicht ausgeschlossen.

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -u. \quad (19)$$

Zu den bisherigen Gleichungen (4)-(7) treten nun auch (16)-(18) als Feldgleichungen hinzu. Den fünf neuen Grundgrößen stehen fünf Differenzialquotienten nach der Zeit gegenüber, so dass auch hier das Kausalitätsprinzip erfüllt ist. Dass das Relativitätsprinzip erfüllt ist, erkennt man daran, dass sich die Gleichungen (16)-(19) vierdimensional schreiben lassen:

$$\begin{aligned} (\mathbf{g}, iu) &= \Gamma_{\rho\alpha\delta} \omega, \\ Div(\mathfrak{k}, iw) &= -\gamma \cdot H_g, \\ \mathfrak{Rot}(\mathbf{g}, iu) &= 0. \end{aligned}$$

Die Ausdrücke für die Energiedichte, den Energiestrom, die Weltfunktion sowie für die Hamiltonfunktion werden nach dem Schema des elektromagnetischen Abschnittes angepasst und man erhält:

$$\begin{aligned} \mathfrak{S} &= [\mathfrak{E} \cdot \mathfrak{H}] - \varphi \cdot \mathbf{v} + u \cdot \mathfrak{k} \\ W &= H + \mathfrak{H} \cdot \mathfrak{B} - \mathbf{v} \cdot \mathbf{f} + u \cdot w \\ dH &= \mathfrak{E} \cdot d\mathfrak{D} - \mathfrak{B} \cdot d\mathfrak{H} - \varphi \cdot d\rho + \mathbf{f} \cdot d\mathbf{v} + \mathfrak{k} \cdot d\mathbf{g} - w \cdot du - \gamma \cdot H_g \cdot d\omega. \end{aligned}$$

Mie bemerkte schließlich, dass die Gleichungen der Gravitation aus dem Hamiltonprinzip folgen, falls man die entsprechend erweiterte Hamiltonfunktion zugrunde legt, allerdings führte er diesen Beweis nicht mehr aus.

Hiermit hatte Mie sein Ziel erreicht, die „Grundlagen“ zu schaffen, aber zufrieden war er nicht, die Gravitation zeigte „sich nach wie vor spröde“.<sup>52</sup> Immerhin schien die Theorie den bisherigen Erfahrungstatsachen nicht zu widersprechen und gerade die Gravitation konnte mit dem speziellen Relativitätsprinzip in Einklang gebracht werden. Desweiteren konnte Mie zwei Vorhersagen machen: Die beiden neuen Resultate waren zum einen eine Temperaturabhängigkeit der Beziehung zwischen schwerer und träger Masse, die in einer Größenordnung von  $10^{-12}$  schwankt, so dass es in absehbarer Zeit für Mie keine Hoffnung auf Überprüfung dieser Aussage gab. Zum anderen folgt aus der Theorie die Existenz einer weiteren Art von Longitudinalwellen, die ebenfalls von fast unbeobachtbarer Größenordnung sind. Mie hatte deswegen wenig Hoffnung auf eine experimentelle Bestätigung dieser Vorhersagen.<sup>53</sup>

---

<sup>52</sup> [Mie 1913, S. 64]

<sup>53</sup> *ibid*

## 2.6 Die Schwierigkeiten mit der Theorie der Materie

### 2.6.1 Unauffindbare Weltfunktion

Nach Mies zweiter Grundannahme aus (2.3) ist klar, dass die Hamilton- und die Weltfunktion aus Lorentzinvarianten aufgebaut sein müssen. Deshalb gab Mie die je vier einzigen Möglichkeiten an, aus den Grundgrößen die Summanden dieser Funktionen aufzubauen<sup>54</sup>. Sowohl die Quantitätsgrößen als auch die Intensitätsgrößen umfassen je einen Sechservektor  $(\mathfrak{H}, i\mathfrak{D}) := \mathfrak{F}$ , bzw.  $(\mathfrak{E}, i\mathfrak{B})$  und einen Vierervektor  $(\mathfrak{v}, i\rho) := P$ , bzw.  $(\mathfrak{f}, i\varphi)$ . Aus diesen Größen lassen sich nach Mie je vier unabhängige Lorentzinvarianten aufbauen, er gibt jedoch nur diejenigen für die Hamiltonfunktion an:

- Der Absolutbetrag von  $P$ :  $\sigma = \sqrt{\rho^2 - \mathfrak{v}^2}$ ,
- der Absolutbetrag von  $\mathfrak{F}$ :  $p = \mathfrak{D}^2 - \mathfrak{H}^2$ ,
- das Skalarprodukt  $q = (\mathfrak{H} \cdot \mathfrak{D})$  sowie
- $s = (\rho\mathfrak{H} - \mathfrak{v} \cdot \mathfrak{D})^2 - (\mathfrak{v} \cdot \mathfrak{H})^2$ .

Mie folgerte nun, dass in stationären Systemen nur zwei dieser Invarianten benötigt würden und ging im Folgenden davon aus, dass die Erfahrungen mit Materie und Elektronen damit im Einklang stehen<sup>55</sup>, für ihn hing die Hamiltonfunktion jetzt nur noch von den Invarianten  $\sigma$  und  $p$  ab. Auf die Weltfunktion übertragen bedeutet dies, dass dort nur zwei Invarianten  $\chi = \sqrt{\varphi^2 - \mathfrak{f}^2}$  und  $\eta = \sqrt{\mathfrak{E}^2 - \mathfrak{B}^2}$  vorkommen. Demnach muss sich  $\Phi$  als abbrechende Potenzreihe der folgenden Struktur darstellen lassen<sup>56</sup>:

$$\Phi = -\frac{1}{2}\eta^2 + \sum \alpha_\mu \cdot \chi^\mu + \sum \beta_\nu \cdot \eta^\nu + \sum \gamma_{hk} \cdot \chi^h \cdot \eta^k \quad \mu > 4, \nu > 2, h \geq 1, k \geq 2.$$

Im zweiten Teil seiner Veröffentlichung betrachtete Mie Beziehungen über die Grundgrößen und die Invarianten, die ihn zu verschiedenen Schlussfolgerungen über Gleichgewichtszustände der Felder und die Existenz und Bewegungen von diskreten Partikeln führten. Diese Betrachtungen schienen nicht mit der bekannten Elektrostatik im Konflikt zu stehen, führten aber nicht zu einer konkreten Weltfunktion. Er versuchte<sup>57</sup> sich weiter an einem speziellen Ansatz für die Weltfunktion ( $\Phi = -\frac{1}{2}\eta^2 + \frac{1}{6}a \cdot \chi^2$ ) und konnte sogar eine Formel zur Berechnung

<sup>54</sup> [Mie 1912a, S. 530, 531, 533]

<sup>55</sup> [Mie 1912a, S. 532], Mie sprach hier nicht von der Gravitation.

<sup>56</sup> [Mie 1912b, S. 14], auf die Wahl der Koeffizienten wird hier nicht eingegangen.

<sup>57</sup> [Mie 1912b, S. 18-36]

der Ladung eines Elektrons herleiten<sup>58</sup>. Allerdings hängt diese Formel noch von einem frei wählbaren Koeffizienten ab und so liefert dieser Ansatz keinen eindeutigen Wert für die Ladung des Elektrons. Mie gab sogar zu, dass jeder beliebige Wert angenommen werden konnte und ein Verschmelzen zweier Elektronen so nicht ausgeschlossen wäre. Ebenso existiert in diesem Fall keine Lösung für ein elektromagnetisches Potential ungleich Null. Deshalb können nicht zwei geladene Teilchen nebeneinander existieren:

„Haben zwei nebeneinander liegende Knotenstellen gleiches Vorzeichen, so werden sie sich zu einer [...] vereinigen [...]. Dagegen könnten zwei Knotenstellen von verschiedenem Vorzeichen überhaupt nicht nahe beieinander bleiben, sie müssen weiter und weiter voneinander fliehen.“<sup>59</sup>

Eine Welt, die von dieser Weltfunktion bestimmt wäre, würde schließlich zu zwei Kugeln verschiedener Ladung verschmelzen, die sich voneinander entfernten. Die Ursache für dieses Unglück sah Mie in der Struktur von Differenzialgleichungen, die aus der Weltfunktion folgen. Er kam zu dem Schluss, dass Weltfunktionen, die zu solchen, algebraischen Differenzialgleichungen führen nicht brauchbar sind, jedoch konnte er diese Bedingung an die Weltfunktion nicht anders ausdrücken<sup>60</sup>. Das Problem, eine geeignete Weltfunktion zu finden, blieb ungelöst.

### 2.6.2 Das Superpositionsprinzip versagt

Ein weiteres Problem der Theorie der Materie ist der nicht-lineare Zusammenhang zwischen Quantitäts- und Intensitätsgrößen und die damit verbundene Ungültigkeit des Superpositionsprinzips. Auf Grund der angenommenen Eigenschaften der Grundgrößen befinden sich selbst im Vakuum noch Spuren der Größen  $\varrho$  und  $\mathfrak{v}$ , das heißt  $H_g$  kann nicht Null sein. Das Superpositionsprinzip ist nach Mie dabei allerdings in großer Annäherung erfüllt, so dass ein experimenteller Nachweis praktisch ausgeschlossen schien.<sup>61</sup> Mie kommentierte diese Eigenschaft seiner Theorie kaum, der Verlust des Superpositionsprinzip schient für ihn aber zumindest erwähnenswert: „im Innern der Materie können dagegen  $\mathfrak{E}$  und  $\mathfrak{B}$  komplizierte Funktionen von  $\mathfrak{D}$ ,  $\mathfrak{H}$ ,  $\varrho$ ,  $\mathfrak{v}$  sein. [...] Nur im reinen Äther gilt das Superpositionsprinzip elektromagnetischer Felder, das wir durch die Gleichungen  $\mathfrak{E} = \mathfrak{B}$ ,  $\mathfrak{D} = \mathfrak{H}$  ausdrücken werden.“<sup>62</sup>

<sup>58</sup> [Mie 1912b, S. 37]

<sup>59</sup> [Mie 1912b, S. 38]

<sup>60</sup> [Mie 1912b, S. 39f]

<sup>61</sup> Siehe: [Mie 1913, S. 62].

<sup>62</sup> [Mie 1912a, S. 515]



Ohne dies näher zu begründen war für Mie im Innern der Materie der funktionale Zusammenhang zwischen diesen Größen auf jeden Fall nicht-linear, daraus konnte Mie noch auf die Nichtexistenz von Wellen im Innern der Materie schließen. Auch später in den Wolfskehlvorträgen ging Mie kaum auf diese Problematik ein. Er erinnerte in diesem Zusammenhang lediglich an das durchgerechnete Beispiel der speziell gewählten Weltfunktion  $\Phi$ : Im Gegensatz zu diesem Beispiel sind die Elementarteilchen der realen Welt selbst in äußeren Potentialen stabil, was Mie zum nächsten Thema überleiten ließ:

### 2.6.3 Relativität des Gravitationspotentials

Mies Bild der Materie hat selbst im „Vakuum“ noch die Anwesenheit von Werten sämtlicher Feldgrößen ungleich Null zur Folge. Da nach Mies Annahmen das Gravitationspotential  $\omega$  schon für kleine Werte von  $\rho$ ,  $\mathfrak{v}$  und  $H_g$  entscheidend in die physikalischen Gesetze eingeht, hat dies entscheidende Konsequenzen: Und zwar gilt an Stelle von  $\mathfrak{E} = \mathfrak{D}$  und  $\mathfrak{B} = \mathfrak{H}$  nach Mie nun

$$\mathfrak{E} = e^{-\gamma\omega} \mathfrak{D} \quad \mathfrak{B} = e^{-\gamma\omega} \mathfrak{H}.$$

Das Gravitationspotential hat damit direkten Einfluss z.B. auf die Dielektrizitätskonstante des Vakuums ( $K = e^{\gamma\omega}$ ) und die Permeabilität des Vakuums ( $M = e^{-\gamma\omega}$ ). Weil das Produkt dieser beiden Konstanten wiederum die Lichtgeschwindigkeit liefert folgt somit die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit sowohl im idealen Vakuum als auch im Raum mit konstantem Gravitationspotential. Die Lichtgeschwindigkeit ist in diesem Fall überall konstant 1, sofern von elektromagnetischen Einflüssen abgesehen wird. Natürlich steht dies im Einklang mit Mies Annahme über die Gültigkeit des speziellen Relativitätsprinzip. Mie betonte die Erkenntnis, dass in Räumen mit konstantem Gravitationspotential die Lichtgeschwindigkeit stets die selbe bleibt.<sup>63</sup>

Weiter untersuchte Mie beliebige Gravitationspotentiale: Hier machte er eine Annahme über die Zerlegbarkeit des Potentials in einen konstanten und einen veränderlichen Teil<sup>64</sup>. Der veränderliche Teil  $\omega_1$  nimmt in der Materie die großen, der Singularität entsprechenden Werte an, verschwindet aber im Vakuum. Der restliche Teil  $\omega_0$  ist eine Konstante, so dass die Kombination  $\omega = \omega_0 + \omega_1$  für Mie beliebige, in der Natur vorkommende Strukturen annehmen kann. Es scheint, als sei hiermit für Mie der kompliziertere Fall von veränderlichem Gravitationspotential auf den einfachen Fall mit konstantem Potential zurückgeführt. Wie auch immer, Mie schloss, dass in zwei *leeren* Räumen das Gravitationspotential keinen Einfluss auf die physikalischen Verhältnisse hat, solange die Räume

---

<sup>63</sup> [Mie 1913, S. 62]

<sup>64</sup> [Mie 1913, S. 62f]

sich nur durch das Gravitationspotential unterscheiden. Mie erhob diesen Schluss zum „Prinzip der Relativität des Gravitationspotentials“ und deutete an, dass sich dadurch seine Theorie von den Theorien Abrahams und Einsteins „auf das Schärfste“ unterscheiden, ohne dies zu präzisieren. Für Mie stellte dieses Prinzip eine notwendige Bedingung für die Gültigkeit des Relativitätsprinzips dar.

Im April 1915 vertiefte Mie die Diskussion um den Einfluss des Gravitationspotentials<sup>65</sup>. Er stellte fest, dass es eine Vielzahl von Gravitationstheorien gibt, die sich lediglich in der Verarbeitung des Gravitationspotentials unterscheiden. Es scheint, als hätte Mie hier von der Arbeitsweise Einsteins gelernt, vgl: Abschnitt (3.2), denn Mie unterstrich, dass allgemeine heuristische Prinzipien zur Aussonderung der verschiedenen Theorie-Vorschläge nützlich sein könnten: Zum Beispiel sondert das spezielle Relativitätsprinzip Abrahams Theorie aus, Nordström verstößt gegen das Hamilton-Prinzip und schließlich nennt Mie als drittes Axiom die Relativität des Gravitationspotentials:

„In zwei Räumen von verschiedenem Gravitationspotential können genau dieselben Vorgänge nach genau denselben Gesetzen ablaufen, wenn man sich nur die Maßeinheiten mit dem Wert des Gravitationspotentials in passender Weise geändert denkt“<sup>66</sup>

Um dies zu verdeutlichen, transformierte Mie gegebene Zustandsgrößen  $\omega'$ ,  $(\mathbf{g}, \gamma)'$ ,  $(\mathbf{f}, \varphi)'$  und  $(\mathfrak{B}, \mathfrak{E})'$ , indem er sie jeweils mit den Faktoren  $a, b, c, d$  multiplizierte<sup>67</sup> (z.B:  $\omega = a\omega'$ ). Gleichzeitig muss sich auch die Weltfunktion ebenso transformieren lassen ( $\Phi = e\Phi'$ ), wobei die Quantitätsgrößen  $(H_g, (\mathbf{v}, \rho), \dots)$  ebenfalls geeignet transformiert werden. Mie fand Bedingungen an die Faktoren, so dass in beiden Systemen die selben Grundgleichungen gelten. Zur weiteren Entwicklung sei angedeutet, dass Mie ab etwa 1917, auf jeden Fall ab den Wolfskehlvorträgen, die Formulierung „allgemeine Relativität des Gravitationsfeldes“ benutzte: Nach Mie muss ebenfalls der Einfluss des Gravitationsfeldes berücksichtigt werden. Hier postulierte Mie, dass ein Gebiet mit Gravitationsfeld genauso behandelt werden kann, wie ein von Gravitation freies Gebiet, sofern die Maßverhältnisse geeignet umdefiniert werden. Mit Einsteins Theorie von 1915 war zumindest dieses Problem für Mie gelöst.

---

<sup>65</sup> [Mie 1915]

<sup>66</sup> [Mie 1915, S. 257]

<sup>67</sup> Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um Ähnlichkeitstransformationen, wie auch Einstein erkannte: „Dasjenige, was Sie Relativität des Gravitationspotential genannt haben, dürfte [...] bei jedem System von Feldgleichungen zutreffen, das *linearen* Transformationen gegenüber kovariant ist; es genügt ja schon Invarianz für Ähnlichkeitstransformationen.“ Einstein an Mie, 2. Juni 1917, [Collected Papers 8, Doc 348].

## 2.7 Zum Stellenwert der Theorie der Materie in der Geschichte der Physik

Schon früh erkannte man, dass die Miesche Theorie der Materie schwerwiegende Mängel aufweist und nicht als Weiterführung der Maxwell'schen Elektrodynamik in Frage kommt. Darauf wies zum Beispiel Pauli in seinem Übersichtsartikel über die Relativitätstheorie<sup>68</sup> 1919 hin. Es konnte nämlich nicht nur keine Weltfunktion gefunden werden, die die physikalische Realität beschreiben könnte. Durch die Hinzunahme der Potentiale  $\Phi$  und  $A$  als physikalische Grundgrößen verlor die Theorie ihre Eichinvarianz und es gilt als physikalisch unmöglich, dass die elektromagnetischen Feldgrößen von den Absolutwerten dieser Potentiale abhängen.

Trotzdem machte Mies Theorie auf Wissenschaftler wie Max Born, David Hilbert, Hermann Weyl und Leopold Infeld einen großen Eindruck. Es waren vor allem Mathematiker und hier besonders die Göttinger, die sich für Mies Theorie interessierten. Über den Einfluss auf Hilbert deutete Born zum Beispiel an:

„Aber auch die Abhandlungen von *Abraham, Nordstroem* und *Mie* [...] wurden studiert, und *Hilbert* wurde besonders von den Ideen *Mies* gefesselt, der eine ‘Theorie der Materie’ auf der Grundlage des Relativitätsprinzips aufzubauen versuchte. [...] *Hilbert* knüpfte an die Gedanken an, die *Mies* ‘Theorie der Materie’ zugrunde liegen.“<sup>69</sup>

Hilbert hielt am 20. November 1915 den Vortrag „Die Grundlagen der Physik“, in dem er auf der Basis der Mieschen Theorie und der Entwurf-Theorie von Einstein und Grossmann einen axiomatisch aufgebauten Grundstock für die gesamte Physik geben wollte. Von der Mieschen Theorie wurden vor allem der mathematische Ansatz über die Wirkungsfunktion und die Sichtweise des Elektromagnetismus übernommen. Der Vortrag wurde auch für den Druck vorgesehen und erschien im Frühjahr 1916. Im Dezember 1915 gingen in der Druckerei die Vorlagen ein, die nicht die allgemein kovarianten Gravitationsfeldgleichungen enthielten. Diese wurden erst nachträglich hinzugefügt, da inzwischen Einstein wie bekannt am 25. November 1915 diese Gravitationsgleichungen zuerst gefunden hatte. Da diese Korrektur unkommentiert blieb, gingen für einige Zeit die Historiker davon aus, dass Hilbert die Gleichungen der ART vor Einstein entdeckt habe<sup>70</sup>.

Ebenso hielt Mies Theorie Einzug in Hilberts Vorlesungen (Grundlagen der Physik I, Sommerssemester 1916)<sup>71</sup>, in denen er die Vorzüge und Nachteile der

---

<sup>68</sup> [Pauli 1919]

<sup>69</sup> [Born 1922, S. 91/92]

<sup>70</sup> Dazu siehe: [Corry, et al 1997].

<sup>71</sup> [Hilbert 1916b]

axiomatischen Materietheorie (Elektronentheorie) und der Mieschen Theorie gegenüberstellte. Den ersten Hinweis, dass sich Hilbert mit der Theorie der Materie beschäftigte, bringt uns ein Brief von Mie an Hilbert vom 22. Oktober 1913, in dem er sich über Hilberts Interesse erfreut zeigte. Leider ist der vorausgegangene Brief Hilberts, auf den Mie sich bezog, nicht erhalten<sup>72</sup>.

In den folgenden Abschnitten wird gezeigt, welche Rolle Mies Theorie für verschiedene Wissenschaftler spielte. Leider kann ich dabei nicht immer genau auf die entsprechenden Abhandlungen eingehen. Hierfür ist dieser Rahmen zu klein.

### 2.7.1 Born macht Hilbert auf Mies Theorie neugierig

Es lag wahrscheinlich vor allem an Max Born, dass Hilbert auf Mies Theorie aufmerksam wurde. Born studierte ab 1904 in Göttingen und arbeitete dort seit 1908 mit Minkowski zusammen. Die Schwerpunkte waren dabei die Elektronentheorie, die Spezielle Relativitätstheorie sowie die Natur der Materie. In diesem Zusammenhang zog Mies Theorie fast natürlich Borns Interesse auf sich und Born stellte schon am 17. Dezember 1912, noch bevor Mie den dritten Teil über Gravitation veröffentlicht hatte, die Miesche Theorie der Göttinger Mathematischen Gesellschaft vor. Auch hier ist der Inhalt dieses Vortrags unbekannt<sup>73</sup>. In Hilberts Vorlesungen<sup>74</sup> in diesen Jahren tauchen keine Hinweise oder Kommentare zu Mies Sichtweise auf, obwohl diese thematisch gut zu Hilberts aktuellem Interessensbereich passten. Leo Corry führte dies darauf zurück, dass Mie zu stark in Richtung des elektromagnetischen Weltbildes abstrahierte, während Hilbert die mechanische Sicht vorzog<sup>75</sup>.

Born beschäftigte sich jedoch weiter mit Mies Theorie und hielt im Herbst 1913 den Vortrag *Der Impuls-Energie-Satz in der Elektrodynamik von Gustav Mie*, den Hilbert schließlich zur Veröffentlichung vorsah und der 1914 in den *Göttinger Nachrichten* publiziert wurde<sup>76</sup>. In diesem Vortrag stellte Born die Miesche Theorie in einer klareren mathematischen Sprache dar, wobei er besonderen Wert auf die Rolle des Variationsprinzips in dieser Theorie legte. Außerdem betonte er, dass Mies Theorie im Gegensatz zu älteren Arbeiten in der Lorentzschen Tradition ohne spezielle *physikalische* Annahmen auskommt:

---

<sup>72</sup> [Corry 2000], Mie an Hilbert, 22.10.1913: „Es war mir eine große Freude, zu hören, dass Sie sich mit meiner Theorie der Materie beschäftigen [...]“, dort deutete er weiter an, dass er sich gerade mit einer Arbeit (der „hitzigen Polemik“ über Einsteins Gravitationstheorie) beschäftigte, aus: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen, Code MS D. Hilbert 251, Seite 1.

<sup>73</sup> [Corry 2000]

<sup>74</sup> SS 1912: Elektronentheorie, Bibliothek des mathematischen Seminars, Göttingen  
WS 1912/13: Molekulartheorie der Materie, Nachlass Max Born # 1817 Berlin.

<sup>75</sup> [Corry 2000]

<sup>76</sup> [Born 1914]

„Während die von H. A. Lorentz begründete Elektronentheorie bestimmte Hypothesen über die Konstitution des Elektrons nötig hat [...], hat sich Gustav Mie die Aufgabe gestellt, Abänderungen der Maxwell'schen Gleichungen derart zu versuchen, daß aus den neuen Gleichungen die Existenz von Elektronen, ja sogar allgemeiner die Existenz der materiellen Atome und Moleküle notwendig folgt. [...] Mie hat diesen Gedanken [die Linearität aufzugeben] wohl in der allgemeinsten und elegantesten Weise durchgeführt, die sich auf dem Boden der heutigen, aus Lagrange's analytischer Mechanik gebotenen Physik denken läßt.“<sup>77</sup>

Schon allein die Andeutungen im Hinblick auf die Lagrangesche Mechanik und die Ausschmückung durch die Superlative „allgemeinst“ und „elegantest“ zeigen, dass Born den Vortrag speziell auf Hilbert zugeschnitten haben muss. Born verlegte den Schritt von den gewöhnlichen Gleichungen der Elektrodynamik zu Mies Gleichungen mit dem Schritt von einem quasielastischen System mit dem Ansatz  $\Phi = \frac{a}{2}\dot{q}^2 + \frac{b}{2}q^2$  für die Wirkungsfunktion zu einer Funktion  $\Phi$ , die eine beliebige Funktion von  $\dot{q}$  und  $q$  ist.

In beiden Fällen erhält man aus der Variation des Hamiltonschen Integrals

$$\int_{t_1}^{t_2} \Phi(\dot{q}, q) dt \quad (20)$$

die Bewegungsgleichungen

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial \Phi}{\partial q} = 0 \quad (21)$$

und Mies Gleichungen lassen sich dann aus einem analogen Variationsprinzip herleiten, wenn die elektromagnetischen Feldgrößen nur noch als spezielle Funktionen der vier Raumzeitkoordinaten aufgefasst und in einer tensoriellen Notation behandelt werden. Born betonte, dass Mie nicht die allgemeinste Version des Variationsproblems für ein vierdimensionales Kontinuum angegeben hat und hielt einen Vergleich der beiden für sehr lehrreich.

Auf jeden Fall wird nach Born die Parallele von Mies Theorie zur Lagrange'schen Mechanik besonders deutlich am Beispiel des Energie-Impuls-Satzes: In der klassischen Mechanik ergibt sich aus der Variation in (20) der Satz von der Energieerhaltung, wenn die Zeit in  $\Phi$  eine unabhängige Variable ist, also nicht explizit in  $\Phi$  vorkommt. Born zeigte auf, dass sich nach seinen mathematischen Methoden in ähnlicher Weise ein verallgemeinerter Energie-Impuls-Satz aufstellen läßt. Daraus kann man den Mieschen Energie-Impuls-Satz ableiten, wenn man analog zur klassischen Mechanik die allgemeinere Forderung stellt, dass die

---

<sup>77</sup> [Born 1914, S. 23]

vier unabhängigen Variablen  $(x, y, z, t)$  der Raum-Zeit nicht explizit in die Wirkungsfunktion  $\Phi$  eingehen dürfen. Dazu schrieb Born:

„Diese soeben hervorgehobene Annahme Mies, daß die Funktion  $\Phi$  von  $x, y, z, t$  unabhängig ist, ist auch der wahre mathematische Grund für die Gültigkeit des Impuls-Energie-Satzes.“<sup>78</sup>

Das war Borns zentrales Anliegen seiner Abhandlung: Er zeigte, wie mit Mies Ansätzen aus mathematischen Überlegungen die Erhaltungssätze von Energie und Impuls auch in der Elektrodynamik zu folgern sind.

Born legte weiter dar<sup>79</sup>, wie aus dem allgemeinen Variationsprinzip für ein vierdimensionales Kontinuum die beiden Spezialfälle der Elastizitätstheorie von Herglotz und der Miesche Elektrodynamik zu gewinnen sind:

In dem vierdimensionalen Kontinuum sollen die Projektionen der Verrückungen der Punkte auf ein rechtwinkliges Koordinatensystem durch

$$u_\alpha = u_\alpha(x_1, x_2, x_3, x_4) \quad \alpha = 1..4 \quad (22)$$

gegeben sein. Vereinbart man die kürzere Schreibweise

$$a_{\alpha\beta} = \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} \quad (23)$$

und enthält die Funktion  $\Phi(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{44}; u_1, \dots, u_4)$  nun alle Eigenschaften des Kontinuums, dann bestimmt das Verschwinden der Variationsableitungen von

$$\int \Phi(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{44}; u_1, \dots, u_4) dx_1 dx_2 dx_3 dx_4 \quad (24)$$

sämtliche Deformationen des Kontinuums. Mit den Abkürzungen

$$\frac{\partial \Phi}{\partial a_{\alpha\beta}} = X_{\alpha\beta} \quad \text{und} \quad \frac{\partial \Phi}{\partial u_\alpha} = X_\alpha \quad (25)$$

erhält man schließlich die zu den Bewegungsgleichungen der klassischen Mechanik (21) analogen Bedingungen

$$\sum_\gamma \frac{\partial X_{\beta\gamma}}{\partial x_\gamma} - X_\gamma = 0. \quad (26)$$

Zu dem von Mie verwendeten Variationsprinzip gelangt man dann durch die Forderung, dass die Funktion  $\Phi$  nur noch von den Differenzen

$$a_{\alpha\beta} - a_{\beta\alpha} = \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} - \frac{\partial u_\beta}{\partial x_\alpha} \quad (27)$$

<sup>78</sup> [Born 1914, S. 32]

<sup>79</sup> Siehe: [Born 1914, S. 27-32]

abhängen darf<sup>80</sup>.

Born stellte noch die von Mie verwendeten Größen den Größen seiner eigenen allgemeineren Notation gegenüber, so wird der Zusammenhang zwischen beiden Darstellungen klarer, siehe *Tabelle (1)*. Dieser Gegenüberstellung entnimmt

	<i>Mie</i>	<i>Born</i>
<i>Koordinaten</i>	$x, y, z, ict$	$x_1, x_2, x_3, x_4$
<i>Potentiale</i>	$f_x, f_y, f_z, i\varphi$	$u_1, u_2, u_3, u_4$
<i>Feldgroessen</i>	$\begin{vmatrix} 0 & -\mathfrak{b}_z & \mathfrak{b}_y & i\mathfrak{e}_x \\ \mathfrak{b}_z & 0 & -\mathfrak{b}_x & i\mathfrak{e}_y \\ -\mathfrak{b}_y & \mathfrak{b}_x & 0 & i\mathfrak{b}_z \\ -i\mathfrak{e}_x & -\mathfrak{e}_y & -\mathfrak{e}_z & 0 \end{vmatrix}$	$(a_{\alpha\beta} - a_{\beta\alpha})$
<i>Wirkungsfunktion</i>	$\Phi(\mathfrak{b}_x, \dots, \mathfrak{e}_x, \dots, f_x, \dots, \varphi)$	$\Phi(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{44}; u_1, \dots, u_4)$

Tabelle 1: Gegenüberstellung: Die Notationen von Mie und Born

man, dass sich die Größen  $a_{\alpha\beta} - a_{\beta\alpha}$  als die Komponenten des elektromagnetischen Sechservektors ( $\mathfrak{B}, \mathfrak{E}$ ) auffassen lassen. Born betonte weiter, dass in Mies Theorie die gewöhnliche Elektrodynamik als Spezialfall enthalten ist, auch wenn er dies nicht explizit beweist.

Corry legte dar, wie Born durch seinen Vortrag Hilbert, der bezüglich des axiomatischen Aufbaus erst kürzlich ähnliche Forderungen betonte, beeinflusst haben konnte. Hilbert hielt seit 1905 Vorlesungen über die Grundlagen der Physik, in denen vor allem das mechanische Weltbild der klassischen Mechanik vorgestellt wurde. Borns ständige Vergleiche der Mieschen Theorie mit der Langrangeschen Mechanik konnten ihre Wirkung auf Hilbert also kaum verfehlen. Da Hilbert ebenso desöfteren darauf hinwies, dass die physikalischen Theorien zu vereinheitlichen seien, natürlich im Rahmen seiner axiomatischen Methode, konnte Hilbert hier eine Chance erkennen, mit Hilfe von Mies Ansatz diesem Ziel näher zu kommen.<sup>81</sup>

Weiter weist Corry darauf hin, dass eine Woche vor Borns Vortrag die Entwurf-

---

<sup>80</sup> Genaugenommen kommt man von Borns Darstellung zu Mies Variationsprinzip erst mit einer Legendretransformation. Mit Borns Darstellung spart man sich jedoch einige Nebenbedingungen, die Mie machen muss [Born 1914, S. 29].

<sup>81</sup> Siehe [Corry 2000]. Hier sollte man an Hilberts 6. Problem von 1900 erinnern, dort forderte er die „mathematische Behandlung der Axiome der Physik“ [Wußing 1971, S. 47-49], Mies Formalismus schien für Hilbert in diese Richtung zu weisen.

Theorie von Einstein und Grossmann in der mathematischen Gesellschaft diskutiert wurde<sup>82</sup>. Dies ist besonders interessant, da Hilbert auf den Mieschen Ideen aufbaut und sie mit Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie in den „Grundlagen der Physik“<sup>83</sup> kombinierte um so die gesamten Erscheinungen der Physik auf einer gemeinsamen mathematischen Grundlage axiomatisch zu beschreiben.

### 2.7.2 Hilberts Adaption der Mieschen Theorie

Hilberts Artikel „Die Grundlagen der Physik“ erschien in insgesamt drei verschiedenen Versionen (1916, 1924, 1932) und basierte auf einem Vortrag in Göttingen vom 20. November 1915. Jeder dieser Artikel wurde gegenüber seiner vorhergehenden Ausgabe, beziehungsweise dem Vortrag, an entscheidenden Stellen abgeändert, ohne dass dies gebührend kommentiert wurde. Somit konnte Hilbert eine Zeit lang unter den Historikern, besonders in der Prioritätsfrage um die Entdeckung der allgemein kovarianten Feldgleichungen, Verwirrung stiften. Hier beziehe ich mich auf den 1916 erschienenen Artikel.<sup>84</sup>

Dieser „Grundlagenartikel“ basiert zum einen auf der Mieschen Theorie der Materie von 1912/13 und zum anderen auf der Entwurf-Arbeit von Einstein und Grossmann aus dem Jahr 1913. Von Mie wurde die Struktur der Materie im elektromagnetischen Sinne übernommen und die Struktur der Raum-Zeit auf der Basis des metrischen Tensors stammte aus der Entwurf-Arbeit:

„Die gewaltigen Problemstellungen von Einstein sowie dessen scharfsinnige zu ihrer Lösung ersonnenen Methoden und die tiefgreifenden Gedanken und originellen Begriffsbildungen, vermöge derer Mie seine Elektrodynamik aufbaut, haben der Untersuchung über die Grundlagen der Physik neue Wege eröffnet.“<sup>85</sup>

Das erste Axiom in Hilberts Theorie ist „Mie’s Axiom von der Weltfunktion“. Hier erweiterte Hilbert den Satz der Argumente der von Mie postulierten Hamiltonfunktion  $H$ , so dass sie nun von den Komponenten des metrischen Tensors  $g_{\mu\nu}$ , seinen ersten und zweiten Ableitungen, sowie von den Komponenten des elektromagnetischen Viererpotential  $q_l$  und seinen ersten Ableitungen abhängt. Aus dem Variationsprinzip

$$\delta \int H \sqrt{g} d\omega \quad \text{mit} \quad g = g_{\mu\nu}, \quad d\omega = d\omega_1 d\omega_2 d\omega_3 d\omega_4 \quad (28)$$

---

<sup>82</sup> Siehe [Corry 2000].

<sup>83</sup> [Hilbert 1916a]

<sup>84</sup> [Hilbert 1916a]

<sup>85</sup> [Hilbert 1916a, S. 395]



konnte Hilbert dann die grundlegenden Feldgleichungen<sup>86</sup> ableiten. Klar ist, dass Hilbert sich dabei mehr auf die Bornsche Überarbeitung der Mieschen Theorie bezog, als auf die Originalarbeit von Mie. Dies betonte er in einer Fußnote, wobei er nochmals hervorhob, dass es Mie war, der die Wirkungsfunktion in entsprechender Weise in die Elektrodynamik einführte:

„Mie’s Weltfunktionen enthalten nicht genau diese Argumente; insbesondere geht der Gebrauch der Argumente auf Born zurück; es ist jedoch gerade die Einführung und Verwendung einer solchen Weltfunktion im Hamiltonschen Prinzip das Charakteristische der Mie’schen Elektrodynamik.“<sup>87</sup>

Als zweites Axiom postulierte Hilbert die Invarianz der Hamilton-Funktion  $H$  unter beliebigen Transformation. Dieses Axiom bezieht sich somit sowohl auf Einstein als auch auf Mie. Mie hatte (siehe 2.4) gezeigt, dass die Invarianz von  $H$  für Lorentztransformationen auch die Invarianz der aus  $H$  abgeleiteten Feldgleichungen induziert. Von Einstein stammte die Forderung nach der allgemeinen Kovarianz, jedoch spielte für ihn das Variationsprinzip nur eine untergeordnete Rolle. Somit verschmelzen in Hilberts zweitem Axiom Einsteinsche und Miesche Ansätze. Auch dies betonte Hilbert in einer weiteren Fußnote.

An Hilberts Behandlung der Weltfunktion erkennt man deutlich, dass er sich auf die Abhandlung von Born bezieht und nicht direkt auf Mies Artikel. Hilbert machte die Annahme, dass sich die Funktion  $H$  in zwei Teile  $H = K + L$  aufspalten läßt<sup>88</sup>, wobei  $K$  für die Gravitationsgleichungen verantwortlich, also eine Funktion der  $g_{\mu\nu}$  und der entsprechenden Ableitungen bis zur zweiten Ordnung sein soll (im Einsteinschen Sinne). Dagegen soll  $L$  für den elektromagnetischen Teil zuständig sein und von den elektromagnetischen Potentialen ( $q_s$ ), seinen Ableitungen ( $q_{sk} = \partial q_s / \partial x_k$ ) und den Komponenten ( $g_{\mu\nu}$ ) des metrischen Tensor abhängen. Daraus folgte Hilbert, dass in  $L$  die Ableitungen der elektromagnetischen Potentiale nur in der Form  $M_{ks} = q_{sk} - q_{ks}$  eingehen können. Dies ist genau der Ausdruck (27), den Born als Bedingung für Mies Theorie abgeleitet hatte. Damit hängt die Funktion  $L$  nicht von den Ableitungen  $q_{sk}$  der Potentiale ab, sondern spezieller von den Größen  $M_{ks}$ , die sich wieder als die Komponenten des Sechservektors ( $[E]$ ,  $[B]$ ) auffassen lassen<sup>89</sup>. Dies ist für Hilbert das „Resultat, durch welches erst der wahre Charakter der Maxwell’schen Gleichungen bedingt

---

<sup>86</sup> Hier sollte erwähnt werden, dass es nicht Hilberts zentrales Anliegen war, zum Beispiel die allgemein kovarianten Feldgleichungen aufzustellen. Ihm ging es vor allem um die Erstellung eines Gesamtkonzepts der Physik im Sinne seiner axiomatischen Methode.

<sup>87</sup> [Hilbert 1916a, Fußnote (1) auf Seite 396].

<sup>88</sup> Dies ist notwendig, da Hilbert sonst vor einem ähnlichen Problem wie Mie steht, nämlich keine geeignete Weltfunktion zu finden.

<sup>89</sup> Siehe (27) und den anschließenden Vergleich der Mieschen und Bornschen Größen.

ist“ und dieses Resultat folgerte er aus seinem zweiten Axiom über die allgemeine Invarianz.<sup>90</sup>

Hilbert zeigte schließlich noch, dass sein Ansatz für die Energie im Grenzfall der Abwesenheit von Gravitationsfeldern zu Mies Energietensor führt und dieser sich allein aus der Größe  $L$  ableiten läßt, was ihn von der Richtigkeit seiner entwickelten Theorie überzeugte.

In seiner Vorlesung *Die Grundlagen der Physik I*<sup>91</sup> aus dem Sommersemester 1916 wurde der Mieschen Theorie ebenfalls eine besondere Stellung zugewiesen. Dort stellte Hilbert im letzten Viertel der Vorlesung den Konsequenzen der atomistischen Hypothese (§26) Schlüsse aus Mies Ätherbegriff gegenüber (§§27-30), wobei er jeweils Vor- und Nachteile der beiden Ansätze abwägte. Hilbert stellte in dieser Vorlesung die wesentlichen Punkte der Mieschen Theorie erneut vor, wobei im Mittelpunkt seines Interesses natürlich der mathematische Aufbau der Theorie stand. Er leitete als Beispiel direkt aus dem Hamiltonschen Prinzip die allgemeinen Differenzialgleichungen für die Existenz eines Elektrons her.

Zu den Vorteilen der Theorie der Materie zählte Hilbert, dass dort das physikalische Geschehen ausschließlich durch die Langrangeschen Differenzialgleichungen gegeben ist, im Gegensatz zur Elektronentheorie, die auf einem Gemisch aus Funktional-, Differenzial- und Integralgleichungen fußt. Weiter wertete Hilbert die Aufnahme der Potentiale in die Grundgleichungen als elementar, durch sie sei das Kausalitätsprinzip von vornherein erfüllt und letztendlich „ist in dieser Theorie eine prachtvolle Harmonie vorhanden“<sup>92</sup>. An dieser Stelle wird die gleiche Auffassung des Kausalitätsprinzips bei Hilbert und Mie deutlich, womit Hilberts Interesse an dieser Theorie gestützt wurde.

Als Nachteile wertete Hilbert, dass in der Theorie die Lichtgeschwindigkeit mit ihrer Konstanz eine besondere Rolle spielt, die Gravitation nicht eingebunden ist und schließlich noch implizite Fernwirkungskräfte im Spiel sind. Letztere beruhen nach Hilbert auf der Tatsache, dass in Mies Theorie die euklidische Geometrie vorausgesetzt ist und damit die Koordinatenachsen starre Gebilde sind.

### 2.7.3 Einstein zu den Theorien von Mie und Hilbert

Zu den Theorien von Mie und Hilbert sind nicht allzuviele Stellungnahmen von Einstein aufzufinden. Auf jeden Fall schätzte Einstein Ende 1913 die Miesche Theorie als eine überflüssige Theorie ein. In einem Brief an Erwin Freundlich schrieb er im August 1913:

---

<sup>90</sup> [Hilbert 1916a, S. 402, 403], siehe dazu auch [Corry 2000].

<sup>91</sup> [Hilbert 1916b]

<sup>92</sup> [Hilbert 1916b, S. 102]

„[...] Es bestehen noch die Relativitätstheorie der Gravitation von Mie und Nordström. Erstere ist phantastisch und hat meiner Meinung nach eine verschwindend kleine innere Wahrscheinlichkeit.“<sup>93</sup>

Diese Bemerkung erfolgte etwa einen Monat vor der hitzigen Diskussion zwischen Mie und Einstein im Anschluss an Einsteins Vortrag vor der Naturforscherversammlung in Wien<sup>94</sup>. Einstein bezog sich in dieser Aussage wahrscheinlich ausschließlich auf die Miesche Behandlung der Gravitation, denn nur das Gravitationsproblem stand zu dieser Zeit im Mittelpunkt von Einsteins Interesse. Allerdings gestand er in Wien ein, die Miesche Theorie nicht genauer betrachtet zu haben. Dieser kleine Widerspruch macht Einsteins Arbeitsweise deutlich: offensichtlich hatte er schnell verstanden, dass Mies Konzeptueller Ansatz weit von seinen eigenen Vorstellungen entfernt war, und so verlor er schnell jedes Interesse an dieser Theorie. Es könnte sein, dass Einstein sich nach dieser Debatte die Miesche Theorie betrachtete, um auf die von Mie angekündigte Veröffentlichung geeignet reagieren zu können, allerdings finden sich nirgendwo Anzeichen dafür. Man kann wohl davon ausgehen, dass er das Miesche Matrie-Konzept zu diesem Zeitpunkt vollkommen ignorierte.

Deutlicher wird Einstein später, wenn er im Dezember 1915 in einem Brief an Arnold Sommerfeld Hilberts „Grundlagen der Physik“ kommentiert:

„Soviel ich von Hilbert's Theorie weiss, bedient sie sich eines Ansatzes für das elektrodynamische Geschehen, der sich abgesehen von der Behandlung des Gravitationsfeldes - eng an Mie anschließt. Ein derartiger spezieller Ansatz lässt sich aus dem Gesichtspunkte der allgemeinen Relativität nicht begründen.“<sup>95</sup>

In dieser Bemerkung machte Einstein deutlich, dass ihm auch der elektromagnetische Teil an der Mieschen Theorie missfiel, wobei man berücksichtigen muß, dass sich Einstein vor allem an dem „speziellen Ansatz“ von Mie störte. Einstein kritisierte hier den speziellen Ansatz im Sinne der Invarianz gegenüber Lorentztransformationen, die der Mieschen Theorie zugrunde liegen. Seine Kritik an Hilbert ist also im wesentlichen auf die Verwendung der Mieschen nicht-relativistischen Ideen zurückzuführen.

Bei dieser Bemerkung Einsteins sollte beachtet werden, dass er zu diesem Zeitpunkt wohl noch nicht den Grundlagen-Artikel in der veröffentlichten Fassung vom März 1916 („Soviel ich von Hilbert's Theorie weiss“) kannte und sich nur auf eventuelle Andeutungen durch Hilbert stützen konnte.

---

<sup>93</sup> Einstein an Freundlich, August 1913, in: [Collected Papers 5, Doc. 468].

<sup>94</sup> Mehr zu dieser hier angedeuteten Begegnung im Abschnitt (4.2.1).

<sup>95</sup> Einstein an Sommerfeld, 9. Dezember 1915, in: [Collected Papers 8, Doc. 161].

Nach der Veröffentlichung der „Grundlagen“ zeichnete Einstein zumindest gegenüber Hilbert persönlich ein positiveres Bild der Hilbertschen Theorie, wie ein Brief vom Mai 1916 belegt:

„Ich sitze hinter Ihrer Relativitätsarbeit, über die ich [...] referieren muss und plage mich redlich. Ihre Methoden bewundere ich schon, soweit ich sie begriffen habe.“<sup>96</sup>

Hierbei wird ihn zumindest erfreut haben, dass seine Theorie von Hilbert nicht einfach in die ursprüngliche Miesche Theorie integriert wurde sondern statt der Invarianz unter Lorentztransformationen von Hilbert der allgemeinere Ansatz gewählt wurde. Zu betonen ist noch, dass Einstein mit keinem Wort an Hilbert die Verwendung der Mieschen Theorie erwähnte. Ich denke, dass Einstein dies bewusst unterließ, da er noch immer nicht von den Mieschen Konzepten überzeugt war und ihn an Hilberts Überlegungen vor allem der direkte mathematische Zugang zu seinen Feldgleichungen interessierte. Kurz zuvor war Einstein selbst damit beschäftigt, seine Gleichungen aus einem Variationsprinzip abzuleiten.<sup>97</sup>

In seinen Veröffentlichungen und gegenüber anderen Briefpartnern war Einsteins Haltung gegenüber der Hilbertschen Theorie durchaus kritischer, an Weyl schrieb er zum Beispiel später, im November 1916, dass Hilberts Theorie „kindlich [sei], im Sinne des Kindes, das keine Tücken der Aussenwelt kennt“<sup>98</sup>.

Gerade die Einführung der Potentiale, die Hilbert mit Hinblick auf die Kausalität sehr schätzte (und die später von Pauli als größter Makel der Mieschen Theorie angesehen wurde), sah Einstein mit Skepsis. In den Entwürfen zu einer Arbeit im März 1916 schrieb er:

„Die von Hilbert im Anschluß an Mie eingeführte Voraussetzung, dass sich die Funktion  $H$  durch die Komponenten eines Vierervektors  $q_\rho$  und dessen erste Ableitungen darstellen lassen, halte ich für wenig aussichtsvoll.“<sup>99</sup>

Etwa drei Jahre später modifizierte Einstein seine Feldgleichungen ein weiteres Mal, dabei spielten Überlegungen über den Einfluss des Gravitationsfeldes auf die Materie eine Rolle. Hier wurde die Miesche Theorie schon weniger kritisiert,

---

<sup>96</sup> Einstein an Hilbert, 25. Mai 1916, in: [Collected Papers 8, Doc. 221].

<sup>97</sup> Von März 1916 stammt ein Manuskript zu diesem Thema, im November erschien ein entsprechender Artikel, [Collected Papers 6, Doc 31, 41].

<sup>98</sup> Einstein an Hermann Weyl, 23. November 1916, [Collected Papers 8, Doc. 278].

<sup>99</sup> Dieser Satz wurde von Einstein gestrichen und erschien nicht in Druck, siehe: [Collected Papers 6, Doc. 31, Fußnote 3].

als in den vorangehenden Bemerkungen bis 1916: Einstein deutete sogar etwas wie Respekt an: „Insbesondere G. Mie hat dieser Frage tiefere Untersuchungen gewidmet.“<sup>100</sup> Jedoch kritisierte er kurz darauf erneut die Einführung der Potentiale.

Eine kleine Bemerkung in einem Brief an Mie („Mit ihren Ansichten über die Materie stimme ich überein“<sup>101</sup>) läßt erahnen, dass sich Einstein offener gegenüber den Fragen nach der Struktur der Materie zeigte, allerdings gab er hierzu keine auffindbare konkretere Stellungnahme ab.

#### 2.7.4 Weitere Einflüsse der Mieschen Theorie

Neben Born und Hilbert beschäftigten sich weitere Physiker mit Mies Theorie, wobei jeweils verschiedene Aspekte der Theorie im Vordergrund standen. Die Miesche Behandlung der Gravitation spielte dabei schon früh keine Rolle mehr, da auch Mie sich schnell von ihr distanzierte. Die Ideen zur Elektrodynamik schienen dagegen für einige Zeit noch von größerer Bedeutung.

So wurden ab 1918 in weit verbreiteten Abhandlungen über die Relativitätstheorie auch ganze Abschnitte der Mieschen Theorie gewidmet. Als Beispiele seien hier das berühmte Buch *Raum-Zeit-Materie* von Hermann Weyl von 1918, der Enzyklopädie-Artikel von Wolfgang Pauli Jr. im Jahr 1919 und das Lehrbuch *Die Relativitätstheorie* von Max von Laue aus dem Jahr 1923<sup>102</sup> genannt.

Für Pauli war die Miesche Theorie von Bedeutung, da dort zum ersten Mal mittels der Weltfunktion, hier  $L$  genannt, die elektromagnetischen Feldgleichungen ableitbar waren und die Theorie sogar Masse und Ladung der Elementarteilchen ohne Zusatzannahmen lieferte. Das Miesche Materie-Konzept spielte für Pauli keine Rolle. Allerdings betonte er, dass Mies Theorie scheitern muss, wenn auch nicht wegen der Tatsache, dass bisher keine geeignete Weltfunktion gefunden werden konnte:

„Eine viel ernstere Schwierigkeit scheint uns in folgendem bereits von Mie bemerkten Umstand zu liegen. Wenn wir eine Lösung für das elektrostatische Potential  $\varphi$  eines materiellen Teilchens [...] haben, so wird  $\varphi + \text{konst.}$  nicht wieder eine Lösung sein [...]. *Das materielle Teilchen wird also in einem konstanten äußeren Potential nicht existenzfähig sein.* Es scheint uns dies ein sehr schwerwiegender Einwand gegen die Miesche Theorie zu sein.“<sup>103</sup>

---

<sup>100</sup> [Einstein 1919, S. 140]

<sup>101</sup> Einstein an Mie, 22. Dezember 1917, [Collected Papers 8, Doc. 416].

<sup>102</sup> [Weyl 1918, Abschnitt 25, S. 165-173], [Pauli 1919, Abschnitt 64, S. 754-759] und [Laue 1923, Abschnitte 28, 29, S. 254-266].

<sup>103</sup> [Pauli 1919, S. 758-159]

Obwohl diese Schwierigkeiten Laue und Weyl wahrscheinlich bekannt waren, wurden sie von ihnen nicht erwähnt. Laue betonte genauso wie Weyl und Pauli, dass Mies Konzept in der Lage ist, elementare Konstanten wie Ladung und Masse des Elektrons auf Grund des Wirkungsprinzips herzuleiten. Zu Laue ist noch zu sagen, dass er in seiner Abhandlung auch auf die Hilbertsche Behandlungsweise einging und ihr ein eigenes Kapitel widmete<sup>104</sup>.

Besonders Weyl hielt Mies Theorie in dem Bewußtsein der Physiker. Er widmete ihr nicht nur einen Abschnitt in seinem berühmten Lehrbuch *Raum - Zeit - Materie*<sup>105</sup>, bis mindestens 1924 ließ er keine Gelegenheit aus, auf Mies Theorie zu verweisen und auch in den späteren Neuauflagen von *Raum - Zeit - Materie* ist der Abschnitt über Mies Theorie in kaum veränderter Form enthalten. Zum Beispiel 1919 schrieb er in einem Übersichtsartikel über Relativitätstheorien von Mies Theorie als Wendepunkt in der Physik der Materie, wobei auch er die Rolle Einsteins auf einem ähnlichen Niveau ansiedelte:

„Die auf der Substanzvorstellung beruhenden Ansätze [...] erweisen sich in unserer Theorie als unmöglich [...]. Der einzige haltbare Weg, der unter Voraussetzung der Existenz materieller Teilchen zu einer wirklichen Herleitung der mechanischen Gleichungen führen kann, wurde von Mie in dem 3. Teil seiner bahnbrechenden ‘Grundlagen einer Materie’ eingeschlagen und neuerdings von Einstein zum Beweis der integralen Erhaltungssätze für ein isoliertes System überschritten.“<sup>106</sup>

Mit den Problemen der Mieschen Gravitationstheorie im Hinterkopf stellte sich Weyl auf einen ähnlichen Standpunkt, den Mie nach Erscheinen der Hilbertschen Grundlagen geäußert hatte, nämlich die Einsteinsche Gravitationstheorie einfach in die Theorie der Materie zu übernehmen:

„Nach Aufstellung der allgemeinen Relativitätstheorie durch Einstein genügte es aber, Mies Ansätze von dem Boden der speziellen auf den der allgemeinen Relativitätstheorie zu verpflanzen, wie das durch Hilbert geschah, um die Gravitation mit zu umfassen. [...] In Mies fundamentalen Arbeiten aber war zum erstenmal überhaupt Sinn und Aufgabe der reinen Feldphysik klar erfaßt.“<sup>107</sup>

---

<sup>104</sup> Laue unterscheidet die beiden Kapitel: „Mies Theorie der Materie in der beschränkten Relativitätstheorie“ und „Mies Theorie der Materie in der allgemeinen Relativitätstheorie“, wobei letztere die Hilbertsche Adaption darstellt.

<sup>105</sup> Zum Beispiel [Weyl 1993, Kapitel 28].

<sup>106</sup> [Weyl 1919, S. 122-123]

<sup>107</sup> [Weyl 1924, S. 592]

Es ist auffällig, wie Weyl die Miesche Theorie stets mit Umschreibungen wie „bahnbrechend“ oder „fundamental“ hervorhob. Im Zusammenhang mit seinen eigenen Bestrebungen, eine einheitliche Feldtheorie aufzustellen verwundert dies jedoch nicht. Leider ist an dieser Stelle keine tiefgehendere Betrachtung der Bedeutung von Mies Theorie in Weyls umfangreichen Arbeiten möglich, dazu müßte ein eingehenderes Studium der Weylschen Arbeiten auf dem Gebiet der Feldphysik vorangehen. Es sei nur gesagt, dass Weyl bis etwa 1921 von der Feldtheorie im Mieschen Sinne - wenn auch mit anderen, „Weylschen“, Konzepten versehen - überzeugt war, sich jedoch danach davon abwandte:

„In der ersten bis dritten Auflage von RZM [Raum - Zeit - Materie] stellte ich mich - die Schönheit und Einheit der reinen Feldtheorie hat es mir angetan - ganz auf den ersten [Mieschen] Standpunkt; in der vierten bin ich jedoch, aus triftigen Gründen an der Feldtheorie der Materie irre geworden, zu dem zweiten<sup>108</sup> übergegangen.“<sup>109</sup>

Ohne eine Vertiefung in die Weylschen Arbeiten wird es unklar bleiben, wie es zu dem Sinneswandel von Weyl kam. Vor allem ist sonderbar, dass er trotz seiner geänderten Meinung die Miesche Theorie weiter fast überschwänglich lobt und selbst in den späteren Auflagen von *Raum - Zeit - Materie* ohne entsprechende Kommentare wiedergibt<sup>110</sup>.

### 2.7.5 **Zu den nichtlinearen Theorien von Born und Infeld**

Max Born schien von der Theorie Mies sehr gefesselt zu sein, obwohl ihm bewusst war, dass die Theorie auf Grund der verletzten Eichinvarianz scheiterte. Seine Rolle im Hinblick auf Hilbert wurde eben schon beleuchtet. Später, in den dreißiger Jahren, versuchte er sich, zum Teil mit Leopold Infeld, an einer Aufbereitung der Mieschen Ideen, wobei die bekannten Fehler vermieden werden sollten. Born und Infeld starteten neue Versuche<sup>111</sup>, die Quantenmechanik auf die Elektrodynamik zurückzuführen. Dabei beriefen sie sich ausdrücklich auf Variationsmethoden, die Mie in seiner Theorie zum ersten Mal in diesen Zusammenhang brachte. Zum Beispiel schrieb Born 1934 in der Einleitung zu seiner „Quantentheorie des Elektrodynamischen Feldes“:

„I believe, however, that I have found an important result in classical electrodynamics. For the formalism shows clearly that Maxwell's

---

<sup>108</sup> Hier verursacht die Materie das Feld, die Materie ist das eigentlich wirkliche. Mehr dazu in [Weyl 1921, S. 545 ff].

<sup>109</sup> [Weyl 1921, S. 546]

<sup>110</sup> Mehr dazu kann man in [Vizgin 1989] lesen.

<sup>111</sup> Zum Beispiel [Born 1934] und [Born, Infeld 1934].

exquations in the original form are not compatible with the suggested quantum laws; and they have to be replaced by another set of equations, which are a special form of Mies's general field theory.“<sup>112</sup>

In den Arbeiten von Born und Infeld spielten die Lagrangefunktionen wieder eine entscheidende Rolle, jedoch wurde dieses Mal ein anderer Ansatz für  $L$  gewählt als in den früheren Theorien von Mie und Hilbert. Allerdings ging Born einen anderen Weg, der von Hilberts Unabhängigkeitssatz bestimmt wurde. Born wies darauf hin, dass er früher bei Hilbert die Vorlesungen über Variationsmethoden gehört hatte, die ihm noch heute (1934) von großer Bedeutung sind. Den Sprung zur Quantendynamik schaffte Born mit Hilfe des Korrespondenzprinzips, bei dem einander entsprechende Größen der klassischen Physik durch diejenigen der Quantenphysik ersetzt werden.

Die Hoffnung Borns war es zu zeigen, dass bei gewöhnlichen äußeren Feldern oder Wellen von größerer Wellenlänge, die auf ein Elektron einwirken, seine Theorie die klassische Elektrodynamik liefert, während für kleine Wellenlängen die quantendynamischen Effekte gefolgert werden könnten. Born war sich jedoch bewusst, dass seine Theorie kurzfristig zu keinen überprüfbaren Resultaten führen würde. Den Unterschied zu Mies Theorie charakterisierte Born wie folgt:

„Mie first showed the possibility of the generalization of Maxwell's theory through the choice of  $L$  as an arbitrary function of the  $f_{kl}$ ; the difference between this theory and that suggested here is that Mie assumed  $L$  was also a function of the  $\Phi_k$ . Then he defined the densities of charge and current as the derivates of  $L$  with respect to the  $\Phi_k$ . But this assumption leads to serious difficulties [...]“<sup>113</sup>

Hier erkennt man erneut, dass das schwierigste Problem der Mieschen Theorie die Aufnahme der Potentiale zu den Grundgrößen war.

Eine eingehendere Analyse, inwiefern tatsächlich Miesche Konzepte in diese Arbeiten von Born und Infeld eingingen kann hier nicht vorgenommen werden. Auf jeden Fall gab es für eine kurze Zeit erneut die Hoffnung, auf Basis elementarer mathematischer Konzepte die grundlegenden physikalischen Erscheinungen abzuleiten.

---

<sup>112</sup> [Born 1934, S. 411]

<sup>113</sup> [Born 1934, S. 426]





## 3 Verfangen in der Allgemeinen Relativität

Die Spezielle Relativitätstheorie (SRT) hatte Einstein 1905, wenn auch noch nicht unter diesem Namen, fertiggestellt. In ihr bezog sich die „Relativität“ auf diejenigen Bezugssysteme, die von einem beliebigen Inertialsystem aus durch Lorentztransformationen erreichbar waren. Die von der SRT berührten Gebiete der Physik waren Elektromagnetismus und Mechanik. Bis zu einer Theorie der Gravitation mit der Gleichberechtigung aller Bezugssysteme war es ein langer Weg.

In diesem Kapitel wird in drei Stufen der Rahmen gegeben,<sup>114</sup> in dem die Diskussionen zwischen Mie und Einstein (Kapitel 4) stattfanden: Einem groben Abriss der Geschichte der ART folgt ein Überblick über Einsteins zentrale Prinzipien, die zur Debatte standen, und schließlich wird speziell die Problematik des Äquivalenzprinzips verdeutlicht.

### 3.1 Vom „glücklichsten Gedanken“ zur „größten Eselei“ - eine Skizze von Einsteins Weg zur ART

1907 lud Johannes Stark Einstein dazu ein, einen Übersichtsartikel<sup>115</sup> über die SRT für sein Jahrbuch zu erstellen. Während der Arbeit an diesem Aufsatz hatte Einstein die Idee, die er später den „glücklichsten Gedanken meines Lebens“ nannte<sup>116</sup>. Ihm fiel das später so genannte „Äquivalenzprinzip“ ein, das die Gleichwertigkeit eines Inertialsystems mit Gravitationsfeld und eines konstant beschleunigten Systems ohne Gravitationsfeld forderte. Einstein führte in dem Jahrbuch-Artikel dieses Prinzip ein und deutete auf den Zusammenhang mit der Gravitation. Seine Betrachtungen führten zu wichtigen Abweichungen von der Newtonschen Gravitationstheorie:

Die Lichtgeschwindigkeit ist nun nicht mehr eine universelle Konstante, sondern variiert mit dem Gravitationspotential. Dementsprechend laufen in einem Gravitationsfeld alle Prozesse verlangsamt ab, so dass es zu einer Verschiebung des Linienspektrums der Sonne im Vergleich zu einem auf der Erde aus den gleichen Elementen entstandenen Spektrum kommen soll und schließlich noch Lichtstrahlen in Gravitationsfeldern abgelenkt werden. Schon damals machte Einstein sich Hoffnungen, die Anomalie der Merkurbahn zu erklären, wie ein Brief an Konrad

---

<sup>114</sup> Im Wesentlichen stammt die Information dieses Kapitels aus den Artikeln [Norton 1984], [Norton 1985] und [Renn, Sauer 1999].

<sup>115</sup> Zu finden als Dokument 47 in [Collected Papers 2].

<sup>116</sup> Aus: *Grundgedanken und Methoden der Relativitätstheorie in ihrer Entwicklung dargestellt*. Unveröffentlichtes Manuskript, 1920. Zitiert nach [Pais 1986, S. 175].

Habicht<sup>117</sup> zeigt. Jedoch schien zu diesem Zeitpunkt für Einstein ein Nachweis dieser Effekte in weiter Ferne zu liegen.

Bis 1911 veröffentlichte Einstein nichts mehr im Zusammenhang mit der Gravitationstheorie. Sein Arbeitsschwerpunkt lag bis dahin bei der Strahlungs- und Quantentheorie, die er auf den Elektromagnetismus zurückführen wollte<sup>118</sup>. Erst als er die Professur in Prag antrat, nahm er erneut die Arbeit an einer relativistischen Gravitationstheorie auf, zunächst jedoch nur im Rahmen der speziellen Relativitätstheorie. Es erschienen drei Arbeiten<sup>119</sup> zu statischen und stationären Gravitationsfeldern. Die erste erschien 1911, die beiden anderen folgten 1912. Die erste Arbeit aus dem Jahr 1912 geht von dem bekannten Newtonschen Gravitationspotential aus und bringt als Verallgemeinerung die Laplacegleichung  $\Delta c = kc\sigma$ . Da Einstein kurz darauf feststellte, dass dieser Ansatz zu einem Widerspruch mit den Energie-Impulssätzen führte<sup>120</sup>, fügte er in seiner zweiten Arbeit von 1912 der Feldgleichung einen weiteren Term hinzu und erhielt  $c\Delta c + (\text{grad } c)^2/2 = kc^2\sigma$  als neue Gleichung. Dabei musste er zugeben, dass das Äquivalenzprinzip nur noch für unendlich kleine Gebiete gültig war und diese Einschränkung merkwürdigerweise auch für homogene Gravitationsfelder galt.

Es war Max Abraham, der in der Zwischenzeit selbst an einer neuen Gravitationstheorie arbeitete, und 1912, zwischen dem Erscheinen der beiden Einstein-Theorien, die Minkowskische Schreibweise und damit das Linienelement

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - (cdt)^2$$

in die Gravitationstheorie einführte. Dafür erntete er von Einstein heftigste Kritik, denn Einstein sah einen Widerspruch in Abrahams gleichzeitiger Verwendung der Minkowskischen Methoden im Sinne der SRT und der Einführung einer variablen Lichtgeschwindigkeit entgegen dem Sinne der SRT.<sup>121</sup>

Einstein dagegen versuchte nun, die Menge der berechtigten Bezugssysteme zu erweitern und ihm wurde dabei bewusst, dass in rotierenden Systemen die euklidische Geometrie unhaltbar ist. Der Gedanke, Gaußsche Koordinaten zu verwenden kam bei ihm auf und damit entstand für ihn die Problematik, mit der entsprechenden Mathematik geeignet umzugehen. Als Einstein im August 1912 von Prag zurück nach Zürich ging, konnte er diesbezüglich auf die Hilfe seines

---

<sup>117</sup> „Jetzt bin ich mit einer [...] Betrachtung über das Gravitationsgesetz beschäftigt, mit der ich die noch unerklärten Änderungen der Perihellänge des Merkur zu erklären hoffe.“ 24. Dezember 1907, in: [Collected Papers 5].

<sup>118</sup> Siehe Abschnitt (1.2.3).

<sup>119</sup> Diese Arbeiten aus den Jahren 1911 bis 1912 sind in den Collected Papers zu finden, und zwar: [Collected Papers 3, Doc 23], [Collected Papers 4, Doc 3] und schließlich [Collected Papers 4, Doc 4].

<sup>120</sup> Dazu siehe [Norton 1984, S. 106].

<sup>121</sup> Dazu siehe: Cattani und De Maria, [Howard et al. 1989, S. 160-174].

früheren Studienkollegen Marcel Grossmann zählen, der mittlerweile in Zürich als Mathematikprofessor arbeitete. Grossmann fand die geeignete Literatur und Einstein versuchte in Zusammenarbeit mit Grossmann eine Theorie aufzustellen, die sämtlichen Koordinatensystemen gegenüber kovariant war. Die Basis war nun das verallgemeinerte Linienelement in der Form

$$ds^2 = \sum_{\mu\nu}^{4,4} dx_\mu dx_\nu.$$

Mit Hilfe des absoluten Differentialkalküls von Ricci und Levi-Civita schafften sie es schließlich, in dem „Entwurf-Artikel“<sup>122</sup> von 1913 eine entsprechende Mechanik aufzustellen, in der jedoch die Feldgleichungen der Gravitation nicht den Ansprüchen der Allgemeinen Kovarianz genügten.

In den Vorarbeiten zur Entwurf-Theorie verpassten Einstein und Grossmann viele Gelegenheiten, die späteren richtigen Feldgleichungen aufzustellen. Wie Untersuchungen von Einsteins Notizbuch<sup>123</sup> und andere Hinweise aus dieser Zeit ergaben, schlug Grossmann 1912 schon den Ricci-Tensor

$$R_{\mu\nu} = \frac{\partial \Gamma_{\mu\nu}^\lambda}{\partial x^\lambda} - \frac{\partial \Gamma_{\mu\lambda}^\nu}{\partial x^\nu} - \Gamma_{\mu\lambda}^\kappa \Gamma_{\nu\kappa}^\lambda + \Gamma_{\mu\nu}^\kappa \Gamma_{\kappa\lambda}^\lambda \quad (29)$$

als Ansatz in der Feldgleichung vor<sup>124</sup>. Ebenso wurde der Tensor, den Einstein in der ersten der vier Novemberarbeiten von 1915 einführte, betrachtet, bei dem der zweite und vierte Term des Ricci-Tensors (29) fehlten. Um die Jahreswende von 1912/13 betrachteten Einstein und Grossmann sogar die Linearisierung des „Einstein-Tensors“, der 1915 schließlich in den allgemein kovarianten Feldgleichungen auf der linken Seite stand:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R. \quad (30)$$

Jedoch entschieden sich Einstein und Grossmann für andere Gravitationsgleichungen, die, wie sich erst später herausstellte, nur bezüglich linearer Transformationen invariant waren, und noch nicht einmal für die von Einstein ins Auge gefassten Rotationen in Frage kamen. Einstein glaubte bis in den Spätsommer 1915, dass die Rotation in seinen Gleichungen zugelassen war, allerdings beruhte dieser Glaube auf fehlerhaften Rechnungen. Die Gründe für die „verpassten Gelegenheiten“ sind zum Beispiel in [Renn, Sauer 1999] analysiert worden

<sup>122</sup> Dieser Artikel [Collected Papers 4, Doc. 13] wurde von beiden verfasst, allerdings beschränkte sich Grossmann auf den zweiten, den mathematischen Teil, während Einstein für den ersten, den physikalischen Teil zuständig war. Im Weiteren wird dieser Artikel, wie üblich, mit „Entwurf-Artikel“ bezeichnet.

<sup>123</sup> Siehe zum Beispiel die Artikel [Renn, Sauer 1999] und [Norton 1984].

<sup>124</sup> Die  $\Gamma_{\mu\nu}^\lambda$  sind die Christoffelsymbole zweiter Ordnung, siehe [Renn, Sauer 1999, S. 92]. Die hier verwendete Notation ist moderner und unterscheidet sich von Einsteins Schreibweise.

und beruhen danach vor allem auf Einsteins heuristischen Annahmen und nicht, wie oft vermutet wurde, auf Rechenfehlern von Einstein oder Grossmann. Die heuristischen Annahmen waren das Äquivalenzprinzip, das Prinzip der allgemeinen Relativität, eine Art Energieerhaltung sowie ein Korrespondenzprinzip für verschiedene Spezialfälle. Diese Leitfäden führten zu einer Überbestimmung des Problems, geeignete Feldgleichungen aufzustellen und verursachten deshalb die verschiedenen Fehlentscheidungen.

Nach und nach wurden Einstein die verschiedenen Mängel seiner Entwurf-Theorie bewusst: Zum Beispiel errechnete er mit Michele Besso Mitte 1913, dass sie nicht den richtigen Wert für die Abweichung der Perihel-Drehung des Merkur lieferte. Einstein war sich auch bewusst, dass die angegebenen Feldgleichungen nicht allgemein kovariant waren und so suchte er gegen Ende des Jahres 1913 nach physikalischen Argumenten dafür, dass es keine solchen Gleichungen geben kann<sup>125</sup>. Hoffnungen machte sich Einstein, dass seine Gleichungen immerhin noch für rotierende Bezugssysteme gültig waren, jedoch stellte er im September 1915 fest, dass auch diese Transformationen nicht zugelassen waren. Etwa gleichzeitig wurde ihm klar, dass auch seine alternativen mathematischen Ansätze, die Feldgleichungen aus einem Hamiltonprinzip abzuleiten, nicht überzeugten. Schließlich war er im November 1915 soweit, die Entwurf-Theorie zu verwerfen. In einer Reihe von vier Arbeiten gelang Einstein sukzessiv zu den Feldgleichungen

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

mit dem oben genannten „Einstein-Tensor“ (30). Dabei konnte er den richtigen Wert für die bisher unerklärbare Anomalie der Merkurbahn herleiten und für die Ablenkung von Lichtstrahlen im Gravitationsfeld der Sonne erhielt er den etwa doppelten Wert der Entwurf-Theorie. Im Sommer 1919 bestätigten die durch Sir Frank Dyson initiierten Sonnenfinsternis-Expeditionen von Arthur Eddington und Charles Davidson diesen Wert der Lichtablenkung und erregten somit weltweite Aufmerksamkeit für Einstein und seine Theorie<sup>126</sup>.

Im Rahmen einer Diskussion über kosmologische Weltmodelle unter anderem mit Willem de Sitter ergänzte Einstein 1917 seine Feldgleichungen um das sogenannte Kosmologische Glied, das weder die bisher errechneten Vorhersagen noch die allgemeine Kovarianz beeinträchtigte. Eine Antwort auf Kretschmanns Kritik an Einsteins Relativitätspostulat enthält zu Beginn des Jahres 1918 zum ersten

---

<sup>125</sup> Einsteins Lochargument schien zu belegen, dass allgemein kovariante Gleichungen nicht mit dem Kausalitätsprinzip in Einklang zu bringen waren. Einstein glaubte, für einen konstruierten Fall, in einem von Materie freien „Loch“ zwei verschiedene Lösungen  $g_{\mu\nu}$  und  $g'_{\mu\nu}$  zu einer Materieverteilung  $T_{\mu\nu}$  zu erhalten. Zu diesem komplexen Thema helfen vielleicht die Artikel *Out of the Labyrinth?* von Howard und Norton in [Earman et al 1993, S. 30-62], sowie S. 70-81 in: [Stachel 1980] weiter.

<sup>126</sup> Mehr dazu siehe zum Beispiel in [Fölsing 1995, Kapitel IV.5].

Mal das Machsche Prinzip unter dieser Bezeichnung. Dieses Prinzip spielte in Einsteins Physik in unterschiedlichen Versionen schon früher eine wichtige Rolle und war ebenfalls Anlass verschiedener Kollegen zur Kritik. Kosmologisches Glied und Machsches Prinzip sollten noch lange umstritten bleiben. Einstein selbst distanzierte sich später davon und nannte das kosmologische Glied die größte Eselei seines Lebens. Eine weitere Modifikation der Feldgleichungen bleibt weitgehend ungeachtet: 1919 änderte Einstein im Zusammenhang mit Überlegungen über einen eventuellen Einfluss von Gravitationsfeldern auf die Konstitution der Materie die Feldgleichungen erneut ab<sup>127</sup>. Diese kleine Änderung spielte allerdings keine große Rolle und wurde ebenso wieder verworfen.

### 3.2 Die grundlegenden Prinzipien in Einsteins ART

Einsteins Vorgehensweise war im Wesentlichen von seinen heuristischen Prinzipien geleitet und er ließ sich kaum davon beirren, wenn einige seiner Kollegen diese Prinzipien heftigst kritisierten oder ihnen widersprachen. Die verschiedenen Leitmotive Einsteins werden hier kurz erläutert:<sup>128</sup>

**Äquivalenzprinzip:** Das Äquivalenzprinzip behauptet die physikalische Gleichwertigkeit von zwei speziellen Bezugssystemen. Dabei ist das erste ein Inertialsystem im Sinne der SRT, in dem ein homogenes Gravitationsfeld vorhanden ist; das zweite, gravitationsfreie System, ist gegenüber dem ersten derart beschleunigt, dass die Beschleunigungsrichtung entgegengesetzt der Gravitationsbeschleunigung im ersten System ist und dass beide betragsmäßig übereinstimmen. Einstein ging davon aus, dass diese beiden Systeme nicht voneinander zu unterscheiden sind.

Die Grundlage für dieses Äquivalenzprinzip ist die heuristische Annahme, dass träge und schwere Masse vollkommen gleich sind. Hin und wieder wird diese Gleichheit als einfachste Form des Äquivalenzprinzips gedeutet<sup>129</sup>. Einstein betonte zuweilen, dass dieses Prinzip nur in einer Richtung zu sehen ist, nämlich der, in welcher das beschleunigte System als ruhend betrachtet werden kann. Oft wurde das Äquivalenzprinzip so verstanden, dass man beliebige Gravitationsfelder zumindest lokal wegtransformieren kann. Dies bestritt Einstein jedoch ausdrücklich. Im folgenden Abschnitt wird dieses Prinzip näher erläutert.

**Erhaltung von Impuls und Energie:** Auch wenn es sich selbstverständlich anhört, spielte dieser Erhaltungssatz eine wichtige Rolle auf Einsteins Suche nach

---

<sup>127</sup> [Einstein 1919]

<sup>128</sup> In diesem Abschnitt sind die Informationen speziell aus [Renn, Sauer 1999].

<sup>129</sup> Zu den verschiedenen Auffassungen des Äquivalenzprinzips siehe [Hentschel 1990].

der allgemeinen Relativitätstheorie. Wie im vorigen Abschnitt angedeutet wurde, war dies zum Beispiel der Grund, die erste Theorie von 1912 zu verwerfen. Desweiteren testete Einstein in der Vorphase der Entwurf-Theorie seine verschiedenen Tensor-Kandidaten für die linke Seite der Feldgleichungen stets darauf hin, ob sie mit der Energie-Impuls-Erhaltung vereinbar waren. In den Diskussionen zwischen Einstein und Mie spielte dieses Prinzip jedoch kaum eine Rolle.

**SRT und Newtons Gravitationstheorie sind als Spezialfälle enthalten:**

Eine erweiterte Gravitationstheorie sollte, wenn man sich zum Beispiel auf die Bezugssysteme der Speziellen Relativitätstheorie beschränkt, als Näherung die Gleichungen der SRT liefern. Ebenso muss als weitere Spezialisierung für kleine Geschwindigkeiten die Newtonsche Gravitationstheorie als Grenzfall enthalten sein. Dieses sogenannte Korrespondenz-Prinzip<sup>130</sup> diente Einstein als Test für die Gültigkeit seiner verschiedenen Ansätze. Vor allem das Korrespondenzprinzip und Einsteins Vorstellungen, wie eine solche Grenzrelation in tensorieller Notation gegeben sein sollten, verursachten Einstein auf dem Weg zur Entwurf-Theorie ernsthafte Schwierigkeiten.

Solche Beziehungen zwischen klassischen, speziell-relativistischen und den allgemein relativistischen Ausdrücken waren für Einstein, bis auf die Berechnung der Merkur-Anomalie, praktisch die einzigen „überprüfbaren“ Argumente für die Richtigkeit seiner Ansätze. Selbst in der Übersichtsarbeit von 1916 betont er, dass zum Beispiel die Newtonsche Mechanik als Spezialfall in der ART enthalten ist. Übrigens spielten bei Einsteins Suche nach einer einheitlichen Theorie um 1909 ähnliche Motive eine Rolle<sup>131</sup>. Dort sollte eine allgemeinere Theorie die Maxwell-sche Dynamik als Grenzfall enthalten.

**Prinzip der allgemeinen Relativität:** Dieses Prinzip gab der Theorie ihren Namen. Ihm zugrunde liegen fundamentale Vorstellungen über Beziehungen von Raum und Zeit. Nach dem allgemeinen Relativitätsprinzip gibt es a priori kein ausgezeichnetes Bezugssystem mehr und man kommt zu der Erkenntnis, dass allein auf der Basis der Koordinaten physikalische Aussagen gemacht werden können: Fallen zwei Ereignisse in einem Koordinatensystem zusammen, so müssen sie in jedem Koordinatensystem zusammenfallen. Von physikalischen Gesetzen fordert man, dass sie in jedem Koordinatensystem die Physik beschreiben, das heißt, dass nach einem Koordinatenwechsel die entsprechenden Gleichungen noch die selben Aussagen und Bedeutungen beinhalten müssen. Dies erreicht Einstein durch die Forderung der allgemeinen Kovarianz der Gleichungen: Die Struktur einer Gleichung darf durch beliebige Transformationen nicht verändert werden.

---

<sup>130</sup> Dieser Begriff wurde so nicht von Einstein geprägt, ich habe ihn aus [Renn, Sauer 1999] übernommen.

<sup>131</sup> Dazu siehe Abschnitt (1.2.3).

Einstein hoffte, dass in einer Theorie, die das Prinzip der allgemeinen Relativität erfüllt, gleichzeitig das Äquivalenzprinzip gültig ist. Das Relativitätsprinzip wurde ebenfalls von den Fachgenossen kritisch beäugt, zum Beispiel zeigte Kretschmann<sup>132</sup> 1917, dass es kein Problem ist, jedes beliebige Gesetz in eine allgemein kovariante Form zu bringen und Mie bezweifelte schon ab 1913 die Gleichberechtigung aller Bezugssysteme.

**Machsches Prinzip:** Dieses Prinzip erhielt seinen Namen in einer Antwort von Einstein<sup>133</sup> auf den eben erwähnten Artikel von Kretschmann im Frühjahr 1918. Es verlangt im Wesentlichen, dass die Einträge im metrischen Tensor  $g_{\mu\nu}$  vollkommen durch die gesamte Materie und das gewählte Bezugssystem bestimmt sind. Einsteins verschiedene Formulierungen dieses Prinzips stifteten zeitweilig Verwirrung, es konnte mit dem Kausalitätsprinzip verwechselt werden.

Dem Machschen Prinzip ähnelnde Motive hatte Einstein schon früh, zum Beispiel nannte er 1913 in Wien die Tatsache, dass seine Entwurf-Theorie bei Massenzuwachs in der Umgebung einer Testmasse auch einen Trägheitszuwachs der Testmasse impliziert, den Vorteil gegenüber der Nordströmschen Gravitationstheorie. Diese hatte eine Trägheitsabnahme zur Folge.<sup>134</sup> In der Diskussion mit Willem De Sitter über verschiedene Weltmodelle argumentierte Einstein ebenfalls mit ähnlichen Ideen und wurde dazu verleitet, 1917 das Kosmologische Glied in die Feldgleichungen einzuführen.<sup>135</sup> Insgesamt war dieses Prinzip sehr umstritten und wurde später von Einstein wieder verworfen.

### 3.3 Äquivalenzprinzip in der Schwebe

In den verschiedenen Arbeiten Einsteins zur Gravitationstheorie hatte das Äquivalenzprinzip verschiedene Stellungen, trat in diversen Formulierungen auf und war zeitweilig noch nicht ein mal mehr gültig. Dazu kamen unterschiedliche Auffassungen und Haltungen der Fachkollegen zu diesem Prinzip, so dass man in der Entstehungsphase der ART (1907-1915) und seiner Etablierungsphase (ab etwa 1916) von einer „unklaren“ Situation, von einem Äquivalenzprinzip in der Schwebe, sprechen kann.

---

<sup>132</sup> [Kretschmann 1917]

<sup>133</sup> [Einstein 1918]

<sup>134</sup> Siehe: [Einstein 1913, S. 1254, 1260].

<sup>135</sup> Zum Beispiel: [Kerszberg 1986]



### 3.3.1 Der Zeitplan

Im Herbst des Jahres 1907 stellte Einstein die Vermutung auf, dass es prinzipiell keinen Unterschied zwischen einem konstant beschleunigtem Bezugssystem und einem ruhenden, dafür aber mit einem homogenen Gravitationsfeld versehenen System gibt. In dem entsprechenden Artikel in Johannes Starks Jahrbuch<sup>136</sup> drückt Einstein zum ersten Mal dieses Äquivalenzprinzip aus, wenn auch noch nicht unter diesem Namen. Dabei stellte Einstein zum Eingang der Passage über Gravitation die sich nach dem speziellen Relativitätsprinzip aufdrängende Frage:

„Ist es denkbar, dass das Prinzip der Relativität auch für Systeme gilt, welche relativ zueinander beschleunigt sind?“<sup>137</sup>

Mit dieser Frage leitete er eine Betrachtung von „zwei Bezugssystemen  $\Sigma_1$  und  $\Sigma_2$ “ ein, wobei das erste System als konstant mit  $\gamma$  beschleunigt betrachtet wurde und das zweite System als ruhend, dafür aber mit einem *homogenen* Gravitationsfeld versehen. Das homogene Gravitationsfeld in  $\Sigma_2$  sollte eine Beschleunigung von Massen hervorrufen, die vom Betrag nach gleich der des ersten Systems war, jedoch in die entgegengesetzte Richtung wies. Ein Vergleich dieser beiden *verschiedenen* Systeme brachte Einstein zu einer heuristischen Annahme, die entscheidend für die weitere Entwicklung der Relativitätstheorie wurde:

„Soweit wir wissen, unterscheiden sich die physikalischen Gesetze in bezug auf  $\Sigma_1$  nicht von denjenigen in bezug auf  $\Sigma_2$ ; es liegt dies daran, dass alle Körper im Gravitationsfelde gleich beschleunigt werden. Wir haben daher bei dem gegenwärtigen Stande unserer Erfahrung keinen Anlaß zur Annahme, dass sich die Systeme  $\Sigma_1$  und  $\Sigma_2$  in irgendeiner Beziehung voneinander unterscheiden, und wir wollen daher im folgenden die völlige physikalische Gleichwertigkeit von Gravitationsfeld und entsprechender Beschleunigung des Bezugssystems annehmen.“<sup>138</sup>

Als Grundlage dieser Argumentation diente die empirische Tatsache, dass bis dato kein noch so feines Experiment einen Unterschied von träger und schwerer Masse nachweisen konnte. Dementsprechend forderte Einstein die vollkommene Gleichheit dieser beiden Größen, was allein schon ausreichte, um Kritik von anderen Fachgenossen aufkommen zu lassen. Aus der Annahme der Identität von träger und schwerer Masse folgerte Einstein im ersten Schritt, dass man

---

<sup>136</sup> [Einstein 1907]

<sup>137</sup> [Einstein 1907, Seite 454]

<sup>138</sup> [Einstein 1907, Seite 454]

das beschleunigte System entsprechend als *ruhend* betrachten kann, sofern man das geeignete Gravitationsfeld einführt. 1916 wird Einstein lediglich die Richtung vom beschleunigten zum ruhenden System als das Äquivalenzprinzip bezeichnen. Die Umkehrung leitete er dann aus diesem Prinzip ab<sup>139</sup>. Diese Unterscheidung mag damit zusammenhängen, dass in der Natur keine echten homogenen Gravitationsfelder im klassischen Sinne auftreten.

Einstein verwendete das Äquivalenzprinzip eindeutig für eine Erweiterung der möglichen Bezugssysteme gegenüber dem Satz der Speziellen Relativitätstheorie, ohne jedoch das allgemeine Relativitätsprinzip vorwegzunehmen. Es gibt 1907 noch keine Trennung zwischen dem Äquivalenzprinzip und einem Postulat über weitere berechnete Systeme, aber es wird eine Trennung zu der bisherigen klassischen Physik, einschließlich der Speziellen Relativitätstheorie, vollzogen<sup>140</sup>.

Auf den nächsten Schritten auf dem Weg zu einer Allgemeinen Relativitätstheorie, den Arbeiten von 1911 und 1912, die Einstein in Prag erstellte, diente das Äquivalenzprinzip entscheidend als Leitfaden und wurde entsprechend von Einstein in die Öffentlichkeit getragen. Jedoch sah sich Einstein schon recht früh Schwierigkeiten mit diesem Prinzip ausgesetzt. Er musste mit der zweiten Gravitationsarbeit von 1912 zugeben, dass das Äquivalenzprinzip nur noch lokal gilt. Die Feldgleichungen ließen (auch im materiefreien Fall) keine linearen Lösungen mehr zu. Dabei war für Einstein verwunderlich, dass selbst die vom Äquivalenzprinzip ins Auge gefassten homogenen Gravitationsfelder nur noch lokal behandelt werden konnten, die Einschränkung auf infinitesimale Gebiete war nicht auf Grund einer Linearisierung von nicht-linearen Lösungen bedingt, sondern Folge des hinzugefügten Terms  $1/2c \text{ grad } c^2$ , der die Energieerhaltung retten sollte.<sup>141</sup>

Die Entwurf-Arbeit ließ in Einstein offensichtlich wieder die Hoffnung aufkommen, das Äquivalenzprinzip noch retten zu können. Mit der Forderung nach der Gleichberechtigung sämtlicher Bezugssysteme und mit der Erkenntnis, dass der metrische Tensor nicht nur das Bezugssystem, sondern zugleich die Gravitations- und Trägheitserscheinungen erfasst, konnte Einstein hoffen, dass das Äquivalenzprinzip automatisch von einer allgemein kovarianten Theorie erfüllt wurde. Doch schon bei der Aufstellung der Entwurf-Theorie war Einstein klar, dass die dortigen Feldgleichungen nicht allgemein kovariant waren, aber er glaubte, dass rotierende Bezugssysteme und auch die konstant beschleunigten Systeme in der entsprechenden Transformationsgruppe enthalten waren. Wie Einstein jedoch langsam herausfand, war in dieser Theorie das Äquivalenzprinzip noch nicht ein-

---

<sup>139</sup> Siehe [Einstein 1916c] und [Norton 1985, S. 7-9].

<sup>140</sup> [Renn, Sauer 1999, S. 88]

<sup>141</sup> In der ersten Theorie von 1912 war das dritte Newtonsche Gesetz *actio = reactio* nicht erfüllt, damit folgte die Verletzung der Energie-Impulserhaltung, siehe [Norton 1985, S. 18].

mal in der Einschränkung auf infinitesimale Raum-Zeit-Gebiete gewährleistet, da diese Theorie selbst infinitesimale Transformationen auf gleichförmig beschleunigte Systeme nicht zuließ.<sup>142</sup> Wie bekannt, konnte Einstein dieses Problem im November 1915 lösen. Dort gilt eigentlich das Äquivalenzprinzip in der lokalen Formulierung, aber Einstein beharrte weiterhin auf der Formulierung allein über homogene Gravitationsfelder. Dieses Verhalten wirft natürlich die Frage nach dem Zweck des Äquivalenzprinzips auf:

### 3.3.2 Welchem Zweck dient dieses Prinzip?

Einstein formulierte, bis auf wenige Ausnahmen, auch nach 1915 das Äquivalenzprinzip stets in der oben angegebenen Version, in der ein (ausgedehntes) beschleunigtes Bezugssystem als ruhend betrachtet werden kann, sofern man es mit einem geeigneten homogenen Gravitationsfeld versieht. Das Prinzip in dieser Formulierung ist eindeutig nicht auf infinitesimale Gebiete eingeschränkt und Einstein betonte mehrmals, dass es nicht ermöglicht, beliebige Gravitationsfelder wegzutransformieren.

Norton<sup>143</sup> interpretiert Einsteins Beharren auf dieser Version damit, dass Einstein dieses Prinzip „lediglich“ als Fingerzeig für die *Interpretation* des metrischen Tensors verwendet. Dabei unterstreicht Norton, dass dieses Prinzip nicht in der Lage ist, etwas über wirkliche Gravitationsfelder im klassischen Sinne auszusagen. Die von Einstein angegebene Version des Äquivalenzprinzips lässt der  $g_{44}$ -Komponenten des metrischen Tensors eine besondere Bedeutung zukommen, denn in einem homogenen Gravitationsfeld weicht der metrische Tensor  $g_{\mu\nu}$  nur in dieser Komponente von der Minkowskischen Form der Metrik ab. Die  $g_{44}$ -Komponente übernimmt die Rolle des skalaren Gravitationspotentials: Denn leitet man  $g_{44}$  nach den Raumkoordinaten ab, so erhält man ein Gravitationsvektorfeld, welches sich genau wie ein Newtonsches homogenes Gravitationsfeld verhält. Erst diese Eigenschaft der  $g_{44}$ -Komponente legitimierte Einstein dazu, sie auch als Gravitationspotential auffassen zu können.

Mit dieser, erst durch das Äquivalenzprinzip ermöglichten, Erkenntnis im Hinterkopf kann Einstein ab dem Sommer 1912 die gewöhnliche Minkowskische Metrik der SRT als einen speziellen Ausdruck einer Raum-Zeit-Struktur ansehen. Dies ist nach Norton die Rolle des Äquivalenzprinzips. Der nächste, verallgemeinernde Schritt ist nun naheliegend: Einstein kann jetzt sämtliche Komponenten  $g_{\mu\nu}$  des metrischen Tensors in beliebigen Situationen als Manifestationen des Gravitations- oder Trägheitsfeldes auffassen. Ohne das Äquivalenzprinzip bliebe dieser Schritt unmotiviert.

---

<sup>142</sup> Siehe zum Beispiel [Norton 1985, S. 19].

<sup>143</sup> Siehe [Norton 1985, S. 29/30].

Das Äquivalenzprinzip spielt demnach in der Natur keine Rolle. Sondern es ist ein auf der Identität von schwerer und träger Masse begründetes heuristisches Leitbild zur Interpretation des metrischen Tensor. Demnach kann man echte Gravitationsfelder nicht wegtransformieren und selbst messende Physiker können bis zu einem gewissen Grade überprüfen, inwiefern die einwirkenden Kräfte Gravitationswirkungen oder Trägheitswirkungen sind: Betrachtet man zum Beispiel ein in Richtung Erde fallendes Bezugssystem, so wird man doch ein echtes Gravitationsfeld auf Grund von „Gezeitenkräften“ nachweisen können, dass selbst im infinitesimalen Bereich noch überprüfbar ist.

### 3.3.3 Reaktionen der Kollegen

Einsteins Physikerkollegen ließen sich nicht so schnell vom Äquivalenzprinzip überzeugen. Schon gegen Ende des Jahres 1911 lehnte Laue das Prinzip ab und erklärte Einstein:

„Für das Gravitationsfeld im System  $K$  muss doch ein, die Gravitation verursachender Körper vorhanden sein, für das beschleunigte System  $K'$  aber nicht.“<sup>144</sup>

Später erklärte Einstein dazu<sup>145</sup>, dass man ein generell anderes Konzept für Felder benutzen muss, das Wesentliche an einer Feldtheorie sei, dass Felder auch unabhängig von den Quellen existieren können. Diese Sichtweise wurde noch lange Zeit, zum Beispiel von Mie 1918, abgelehnt. Hierbei geht es um das Problem, ob echte Gravitationsfelder, also solche, die von Massen als Quellen ausgehen, von Trägheitskräften zu unterscheiden sind: Zum Beispiel sind die eben angesprochenen „Gezeitenkräfte“ in einem in Richtung Erde frei fallenden System selbst in infinitesimalen Regionen noch nachweisbar<sup>146</sup>.

Noch in den 1920er Jahren hatten renommierte Relativisten ihre Probleme mit dem Äquivalenzprinzip: Eddington argumentierte zum Beispiel, dass ein echtes Gravitationsfeld mit einer Raumkrümmung einhergehe. Solche Raumkrümmungen seien aber absolute Invarianten, die in gravitationsfreien Gebieten, also dort wo die SRT gilt, den Wert null annehmen. Dies steht im Widerspruch dazu, dass man keine von null verschiedene Invariante auf null transformieren kann. Man kann also keine echten Gravitationsfelder wegtransformieren.<sup>147</sup>

<sup>144</sup> Laue an Einstein, 27. Dezember 1911, in: [Collected Papers 5, Doc. 33].

<sup>145</sup> Nach [Norton 1985, S. 15].

<sup>146</sup> Aus diesen Gezeitenkräften schliesst ein mit dem System fallender Physiker sofort, dass er sich in einer brenzligen Situation befindet und nicht schwerelos im Weltall treibt.

<sup>147</sup> [Norton 1985, S. 5]

Schließlich gibt es noch diejenige Gruppe von Wissenschaftlern, denen die gesamte Theorie unverständlich blieb und sie samt ihren grundlegenden Prinzipien allein wegen der Kompliziertheit der Theorie ablehnten. Dazu gesellte sich eine weitere Gruppe mit politischen Zielen, denen besonders der spätere Rummel um die Theorie und seinem Begründer ein Dorn im Auge war. Die letzte Gruppe mischte in ihre Kampagne antisemitische Töne, die Einstein schon ab etwa 1919 verstärkt zu spüren schien<sup>148</sup>.

Der Ingenieur Paul Weyland konnte 1920 genügend Geld bereitstellen, um Physiker zu allerlei Vorträgen gegen die Relativitätstheorie zu überreden. Er gründete die „Arbeitsgemeinschaft deutscher Naturforscher zur Erhaltung reiner Wissenschaft e.V.“, deren Namen schon für sich spricht. Hier wurde in verschiedener Form versucht, die Relativitätstheorie Einsteins als „großen Schwindel“ oder „wissenschaftliche Massensuggestion“<sup>149</sup> darzustellen oder mit falschen Darstellungen, wie der von Ernst Gehrcke, als widerlegt anzusehen. Gehrcke brachte eine alte Berechnung von Paul Gerber, die eine Erklärung für die Anomalie der Merkurbahn liefern sollte, erneut in die Diskussion. Allerdings war dies für die meisten Wissenschaftler ein alter Hut und schon längst als Pseudoerklärung entlarvt. Diese antisemitische Hetzkampagne gegen Einstein und gegen die Relativitätstheorie verlief jedoch vorübergehend im Sande und ebte 1920/21 ab.

Es sei nochmals betont, dass für Einstein das Äquivalenzprinzip ausschließlich auf *homogene* Gravitationsfelder anzuwenden sei. Er wird in der Antwort auf die Kritik von Friedrich Kottler 1916 besonders deutlich, dabei wird noch ein weiteres Ziel erkennbar:

„Läßt sich das Relativitätsprinzip auch auf relativ zueinander (gleichförmig) beschleunigte Bezugssysteme ausdehnen? Die Antwort lautet: Soweit wir die Naturgesetze wirklich kennen, hindert uns nichts daran, das System  $K'$  [ein gegenüber dem als ruhend zu betrachtendem System  $K$  gleichförmig beschleunigtes System] als ruhend zu betrachten, wenn wir relativ zu  $K'$  ein (in erster Annäherung homogenes) Schwerfeld als vorhanden annehmen, denn wie in einem homogenen Schwerfeld, so auch in bezug auf unser System  $K'$  fallen alle Körper unabhängig von ihrer physikalischen Natur mit der selben Beschleunigung. Die Voraussetzung, dass man in aller Strenge  $K'$  als ruhend behandeln dürfe, ohne dass es irgendein Naturgesetz in bezug auf  $K'$  nicht erfüllt wäre, nenne ich 'Äquivalenzprinzip'<sup>150</sup>.“

---

<sup>148</sup> Für diese und weitere Informationen zu diesem Thema siehe [Fölsing 1995, S. 518 ff.].

<sup>149</sup> Zitiert nach [Fölsing 1995, S. 520].

<sup>150</sup> [Einstein 1916c, S. 640]

Wie in vielen anderen Kommentaren schrieb Einstein hier von Systemen, die er als „ruhend“ betrachten kann. Dies ist die Interpretation im Sinne des alten Relativitätsprinzips: Dort wird ebenfalls behauptet, die verschiedenen, mit konstanter Geschwindigkeit zueinander bewegten Systeme haben das gleiche Recht, sich als ruhend aufzufassen. Da es Einstein durch das Äquivalenzprinzip ab 1907 möglich war, die gleichförmig beschleunigten Systeme als ruhend aufzufassen, lag für ihn eine Zeit lang der Schlüssel zu einer Ausdehnung des Relativitätsprinzips in den gleichförmig rotierenden Bezugssystemen:

„Die Behandlung des gleichförmig rotierenden starren Körpers scheint mir von grosser Wichtigkeit wegen einer Ausdehnung des Relativitätsprinzips auf gleichförmig rotierende Systeme [...].“<sup>151</sup>

Diesen noch nicht ausgereiften Gedanken äußerte Einstein im Sommer 1909 in einem Brief an Sommerfeld. Der Anlass war die Diskussion zwischen Born, Ehrenfest, Sommerfeld und Einstein um die Natur starrer Körper. Wie bekannt hatte Einstein seine Probleme mit der Aufgabe, das Relativitätsprinzip auf rotierende Systeme auszudehnen:

„Du siehst, dass ich noch weit davon entfernt bin, die Drehung als Ruhe auffassen zu können!“<sup>152</sup>

Auch hier benutzte Einstein die Formulierung „als Ruhe auffassen zu können“, was seine Hoffnung verdeutlicht, das Relativitätsprinzip in diesem Sinne auszudehnen zu können. Daran mag man auch erkennen, dass Einstein beim Äquivalenzprinzip zumindest wenig daran lag, die Gravitation als einen Spezialfall von Beschleunigung aufzufassen.

---

<sup>151</sup> Einstein an Sommerfeld, 29. September 1909, siehe [Collected Papers 5, Doc. 179].

<sup>152</sup> Einstein an Besso, 26. März 1912, siehe [Collected Papers 5, Doc. 377].



---

## 4 Die Diskussionen zwischen Albert Einstein und Gustav Mie

### 4.1 Vorbemerkungen

Es sind drei für uns interessante persönliche Begegnungen von Gustav Mie mit Albert Einstein belegt. Beide nahmen auf den meisten Naturforscherversammlungen ab 1909 bis 1920 teil, fast immer als Zuhörer, die sich an den Diskussionen beteiligten und jeweils einmal als Redner. Die erste dieser interessanten Begegnungen war in Wien zur 85. Naturforscherversammlung am 23. September 1913. Dort hielt Einstein den Vortrag *Zum gegenwärtigen Stande des Gravitationsproblems*<sup>153</sup>, in dem er über seine mit Marcel Grossmann aufgestellte Entwurf-Theorie und die Gravitationstheorie Nordströms referierte. Mie schien etwas verärgert darüber gewesen zu sein, dass seine in der Theorie der Materie enthaltene Ansicht über die Gravitation von Einstein ignoriert worden war. Die im Anschluss an Einsteins Vortrag folgende Diskussion wurde vor allem zwischen Einstein und Mie bestritten, der Anteil der entsprechenden Dialoge umfasst mehr als zwei Drittel des Raumes im Abdruck dieser Diskussion.

Mie kündigte in dieser Diskussion eine Veröffentlichung an, in der er nachweisen wollte, dass selbst Einsteins Theorie nicht die Identität von schwerer und träger Masse erfüllt, ein Punkt, den Einstein in seinem Vortrag zuvor als wesentliche Voraussetzung einer Gravitationstheorie hervorhob. Ende 1913 reichte Mie die angekündigten „Bemerkungen zu der Einsteinschen Gravitationstheorie“ ein, die im Frühjahr 1914 zweiteilig in der *Physikalischen Zeitschrift* erschienen. Einstein antwortete im Anschluss an Mies zweiten Teil direkt auf diese Artikel.

In einem Brief von Januar 1914 an Erwin Freundlich beschrieb Einstein Mies Artikel als „hitzige Polemik“<sup>154</sup>, war aber auf der anderen Seite darüber erfreut, dass sich seine Kollegen zumindest mit seiner Theorie befassten.

Bis zum folgenden dokumentierten Kontakt vergingen mehr als drei Jahre. Mit Einsteins Feldgleichungen von 1915 und Hilberts „Grundlagen der Physik“, in denen Hilbert auf Gustav Mies Theorie der Materie zurückgreift, änderte sich Mies Haltung zu Einsteins Relativitätstheorie und es begann im Anschluss an Mies Wolfskehl-Vorlesungen ein Briefwechsel zwischen den beiden.

Mie akzeptierte die neuen Feldgleichungen und gab ihnen gute Chancen, die Natur richtig wiederzugeben. Seine Bedenken galten nun vor allem den möglichen

---

<sup>153</sup> [Einstein 1913], anschließende Diskussion in [Einstein/Mie 1913]. Die Informationen über diese Versammlungen finden sich jeweils in den Herbstausgaben der *Physikalischen Zeitschrift*.

<sup>154</sup> In [Collected Papers 5, Doc. 506, etwa 20. Januar 1914] siehe auch [Collected Papers 8, Doc. 348, Fußnote 3 von Doc. 348].



Interpretationen des allgemeinen Relativitätsprinzips. In Göttingen stellte Mie in den Wolfskehl-Vorträgen<sup>155</sup> (5. bis 8. Juni 1917) seine Sichtweise des allgemeinen Relativitätsprinzips dar und gab als alternative Fassung das von ihm aufgestellte „Prinzip von der Relativität des Gravitationspotentials“ an. Ebenso stellte er dort seine Ideen zur Wahl von Koordinatensystemen vor.

Einstein musste die schriftlichen Einladungen von Mie und Hilbert zu diesen Vorträgen aus gesundheitlichen Gründen ablehnen, aber nach der Veröffentlichung der Vorträge in der physikalischen Zeitung ergriff Einstein die Initiative und regte eine längere schriftliche Diskussion an, die in den *Collected Papers*<sup>156</sup> inklusive hilfreicher Anmerkungen festgehalten ist. Die zentralen Themen dieser Diskussion waren die Punkte „Raumkrümmung“, „Kosmologisches Glied“ und die Bedeutung von Bezugssystemen. In dieser Diskussion sind interessante Aspekte dieser Themen beleuchtet worden, die zum Teil auch im Kontext der „Einstein - de Sitter - Weyl - Klein“-Debatte<sup>157</sup> zu sehen sind.

Erst in einer persönlichen Begegnung von Mie und Einstein in Einsteins Wohnung in Berlin Ende März 1918 konnte sich Mie für kurze Zeit mit Einsteins Sichtweisen anfreunden. Doch schon bald darauf kamen Mie wieder Zweifel; da jedoch alle Argumente ausgetauscht waren, endete die Diskussion zu den besprochenen Themen ohne nennenswerte Einflüsse auf die Einstellungen von Einstein und Mie.

Die letzte mir bekannte persönliche Begegnung von Einstein und Mie war zum Anlass der 86. Naturforscherkonferenz zwischen dem 19. und 25. September 1920 in Bad Nauheim<sup>158</sup>. Die Relativitätstheorie an sich stand in Bad Nauheim nicht so sehr im Mittelpunkt des öffentlichen und wissenschaftlichen Interesses und wissenschaftliche Anstöße hatte es dort ebenfalls nicht gegeben. Die Bad Nauheimer Versammlung wurde allerdings mit Spannung erwartet, da dort Einstein und Phillip Lenard aufeinandertrafen: Nach einer gegen die Relativitätstheorie und besonders gegen Einstein gerichteten Veranstaltung der durch Paul Weyland gegründeten „Arbeitsgemeinschaft deutscher Naturforscher zur Erhaltung reiner Wissenschaft e. V.“ griff Einstein am 27. August 1920 im „Berliner Tageblatt“ diese von ihm sogenannte „antirelativistische G.m.b.H.“ an. Allerdings überzog er dabei Lenard mit harscher Kritik. Lenard war bis dahin zwar (teilweise uninformierter) Kritiker der Relativitätstheorie, hatte aber immer alle Formen des

---

<sup>155</sup> [Mie 1917]

<sup>156</sup> [Collected Papers 8]

<sup>157</sup> Siehe dazu Kerszberg, *The Einstein-DeSitter-Weyl-Klein Debate* in: [Collected Papers 8, S.351-357].

<sup>158</sup> Die Vorträge und Diskussionen sind in der *Physikalischen Zeitschrift* **21**, 1921 S. 649-668 zu finden, zu den Vorgängen um Bad Nauheim, Lenard und Einstein siehe [Fölsing 1995, S. 520-528].

Anstands gewahrt<sup>159</sup>. Da nun Einsteins Angriffe auf Lenard öffentlich bekannt waren, erwartete man in Bad Nauheim beim direkten Zusammentreffen der beiden einen Eklat. Vor allem Lenard prägte die an die Vorträge von Hermann Weyl, Gustav Mie, Max von Laue und Ludwig Grebe anschließende Diskussion mit Einstein, doch es gab weder den Skandal, noch wurden nennenswerte wissenschaftliche Neuigkeiten hervorgebracht.

Das Ereignis in Bad Nauheim ist besonders unter dem Gesichtspunkt des Konfliktes zwischen der Gruppe der mathematisch-theoretisch dominierten Physiker wie zum Beispiel Einstein und Weyl, und der Gruppe der Experimentalphysiker um Lenard zu sehen. Beiden Gruppen entfernten sich in den vergangenen Jahren zunehmend voneinander und der Zusammenhang beider Gebiete schien zeitweise vollends zu verschwinden.

Gustav Mies Rolle in Bad Nauheim als kritischer Befürworter der Allgemeinen Relativitätstheorie ist unter diesem Aspekt als Vermittler zwischen den beiden Gruppen zu sehen: Er spielte die praktische Bedeutung der ART herunter ohne zugleich ihre theoretische Berechtigung zu verneinen. Diese Rolle ist im Rückblick auf Mies Biographie nur verständlich, da er sich selbst zwar zur theoretischen Physik hingezogen fühlte, seine wissenschaftliche Biographie ihn aber stets zur Experimentalphysik drängte und er so stets zwischen diesen beiden Stühlen saß.

In diesem Kapitel wird vor allem auf die von Mie zu den verschiedenen Zeiten angesprochenen Kritikpunkte eingegangen. Dabei habe ich eine thematische Trennung versucht, die auf Grund der Nähe der Themen nicht immer eingehalten werden kann. Allerdings scheint mir diese Einteilung nützlich, um sich leichter einen Überblick verschaffen zu können.

## 4.2 Verärgert: Versammlung in Wien und die hitzige Polemik

Bis 1912 stand Einstein mit seinem Bestreben, eine neue Theorie der Gravitation zu finden, fast alleine da. Erst ab 1912 versuchten auch andere Physiker verstärkt Ansätze zu neuen Gravitationstheorien zu entwerfen, darunter vor allem Max Abraham und Gunnar Nordström (siehe *Tabelle 2*). Gustav Mie hatte seine Vorstellungen von der Gravitation in der umfangreichen Abhandlung über die Theorie der Materie sehr gut versteckt.

Am 23. September 1913 hatte Einstein Gelegenheit auf der 85. Naturforscherversammlung in Wien über Gravitationstheorien zu sprechen. Im Auditorium saßen

---

<sup>159</sup> Nach [Fölsing 1995, S. 525], mittlerweile scheinen Belege dafür aufgetaucht zu sein, dass Einstein Lenard doch nicht zu unrecht kritisierte, diese sind mir leider nur als „Gerüchte“ bekannt, so dass ich hier keine geeignete Angabe geben kann.

Juni 1911	Einstein	Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichts ( <i>Ann. d. Ph.</i> )
1912	Abraham	Zur Theorie der Gravitation ( <i>Phy. Z.</i> )
1912	Abraham	Das Elementargesetz der Gravitation ( <i>Phy. Z.</i> )
1912	Nordström	Relativitätsprinzip und Gravitation ( <i>Phy. Z.</i> )
1912/13	Mie	Theorie der Materie ( <i>Ann. d. Ph.</i> )
1913	Nordström	Zur Theorie der Gravitation vom Standpunkt des Relativitätsprinzips ( <i>Ann. d. Ph.</i> )
1915	Einstein	Die Feldgleichungen der Gravitation ( <i>Ann. d. Ph.</i> )
1916	Einstein	Die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie ( <i>Ann. d. Ph.</i> )
1917	Einstein	Kosmologische Betrachtungen ( <i>Ann. d. Ph.</i> )

Tabelle 2: Auswahl von Gravitationstheorien zwischen 1911 und 1917

unter anderem Ernst Lecher (der Leiter der anschließenden Diskussion), Gustav Mie, Max Born und Friedrich Hasenöhr<sup>160</sup>.

In der Diskussion kündigte Mie eine Untersuchung der Einstein-Grossmann-Arbeit an, die am 28. Dezember 1913 in der Redaktion der *Physikalischen Zeitschrift* einging und zweiteilig im Januar und Februar 1914 erschienen ist. Auf diese Untersuchung reagierte Einstein noch in der Februar-Ausgabe der *Physikalischen Zeitschrift* mit dem Artikel „Prinzipielles zur verallgemeinerten Relativitätstheorie und Gravitationstheorie“. Der Vortrag „Zum gegenwärtigen Stande des Gravitationsproblems“ und die anschließende Diskussion werden im Folgenden stets mit „Wien-Vortrag“ und „Wien-Diskussion“ bezeichnet.

#### 4.2.1 Der Wien-Vortrag

Da für den größten Teil der Physiker wohl keine Notwendigkeit bestand, die Newtonsche Gravitationstheorie zu ersetzen oder zu erweitern, beschrieb Einstein zu Beginn des Wien-Vortrages seine Gründe zum Aufsuchen einer neuen Gravitationstheorie, sowie die Probleme, die sich dabei auftaten und wie diese Probleme eingeschränkt werden könnten. Einstein deutete an, dass vor Hertz und Maxwell die elektromagnetischen Vorgänge ähnlich beschrieben wurden wie die Gravitation nach Newton. Wäre die Bewegung der Himmelskörper durch elektri-

<sup>160</sup> Ob Max Abraham und Gunnar Nordström anwesend waren oder nicht, konnte ich noch nicht ausmachen. Nach [Corry 2000] waren sie anwesend, nach [Fölsing 1995, S. 363] nicht. Siehe auch [Busch 1913].

sche Kräfte bestimmt<sup>161</sup> und uns keine weiteren elektromagnetischen Vorgänge bekannt, so würde die Physik mit Hilfe von Keplers Gesetzen allein zum Coulombgesetz gelangen, ohne überhaupt die Maxwellgleichungen zu errahnen. Die Theorie der Gravitation nach Newton befindet sich in genau dieser Situation, ohne dass es Hinweise auf mögliche Erweiterungen der Theorie gibt. Als entscheidendes Argument für eine Änderung der alten Gravitationstheorie brachte Einstein die (spezielle) Relativitätstheorie an:

„Ein solcher direkter Grund liegt aber heute für diejenigen vor, die an der Richtigkeit der [speziellen] Relativitätstheorie festhalten. Nach der [speziellen] Relativitätstheorie gibt es nämlich in der Natur kein Mittel, das uns gestatten würde, Signale mit Überlichtgeschwindigkeit zu senden. Andererseits aber ist einleuchtend, dass wir bei strenger Gültigkeit von Newtons Gesetz die Gravitation verwenden könnten, Momentensignale [...] zu senden;“<sup>162</sup>

Allerdings schränkt die SRT auch die Möglichkeiten zur Modifizierung der Gravitationstheorie ein. Einstein stellte vier Postulate vor, denen eine erweiterte Gravitationstheorie genügen sollte:

- Impuls- und Energieerhaltung sind erfüllt.
- In abgeschlossenen Systemen ist träge Masse gleich schwerer Masse.
- Die Relativitätstheorie gilt im engeren Sinne, d.h. Kovarianz der Gleichungssysteme gegenüber verallgemeinerten Lorentztransformationen gilt.
- „Die beobachtbaren Naturgesetze hängen nicht ab vom Absolutwerte des Gravitationspotentials (bzw. der Gravitationspotentiale).“<sup>163</sup> Physikalische Relationen sind in zwei Orten mit räumlich und zeitlich konstantem Gravitationspotential gleich, auch wenn das Potential an beiden Orten unterschiedlich ist.

Die Berechtigung vor allem der letzten drei Postulate darf nach Einstein bezweifelt werden, denn diese Postulate gleichen eher „einem wissenschaftlichen Glaubensbekenntnis als einem gesicherten Fundament“<sup>164</sup>. Weil Abrahams Theorie nicht mit dem Postulat der speziellen Relativitätstheorie vereinbar ist, sprechen

---

<sup>161</sup> Hierbei denkt Einstein an Planeten-Geschwindigkeiten klein gegen  $c$ . Streng genommen gilt Einsteins Bemerkung nur für Zwei-Körper-Probleme, sobald drei oder mehr elektrisch geladene Körper betrachtet werden, sind abstoßende Kräfte im Spiel.

<sup>162</sup> [Einstein/Mie 1913, S. 1250]

<sup>163</sup> Siehe: [Einstein 1913, S. 1250]

<sup>164</sup> [Einstein 1913, S. 1251]

gegen seine Theorie die selben Gründe, die für die spezielle Relativitätstheorie sind. Einstein bemerkte, er könnte sich Abrahams „Standpunkt anschließen, wenn in Abrahams System Kovarianz gegenüber Transformationen vorhanden wäre, die in Gebieten konstanten Gravitationspotentials in lineare orthogonale Transformationen übergehen.“ Was Einstein hier anspricht ist im Einklang mit dem in Abschnitt (3.2) erläuterten „Korrespondenzprinzip“, nach dem akzeptierte klassische Theorien, bzw. die SRT, als Spezialfall gültig bleiben müssen. Demnach benutze Einstein hier vor allem seine SRT mit Hilfe des Korrespondenzprinzips, um unter einer Vielzahl von Gravitationstheorien bestimmte Theorien herauszuheben.

Als die beiden „natürlichsten“ Theorien, die mit den Postulaten übereinstimmen, stellte Einstein die Nordström-Theorie von 1913 und die „Entwurf-Theorie“ von Einstein und Grossmann aus dem selben Jahr vor.

Zunächst schrieb Einstein die grundlegenden Gleichungen der klassischen Mechanik an, um vorzuführen, wie diese durch Einführung des Gravitationspotentials zum einen zur Nordströmschen Theorie und zum anderen zur Entwurf-Theorie von Einstein und Grossmann führen: Die Bewegung eines Massenpunkt ohne äußere Einflüsse ergibt sich aus der Hamiltonschen Gleichung  $\delta(\int d\tau) = 0$  wobei das Linienelement in der Speziellen Relativitätstheorie die Form  $d\tau := \sqrt{c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2}$  hat. Setzt man  $H := -m \frac{d\tau}{dt}$ , so kann man auch  $\delta(\int -m \frac{d\tau}{dt} dt) = \delta(\int H dt) = 0$  schreiben. Aus der letzten Gleichung folgen mit Planck<sup>165</sup> unmittelbar Energie und Impuls. Zu Nordströms Theorie gelangte Einstein nun durch Hinzufügen eines Skalars, der das Gravitationsfeld bestimmen soll:  $\delta(\int \varphi d\tau) = 0$ . Die Hamiltonsche Funktion ändert sich dementsprechend, aber es macht keine weiteren Schwierigkeiten Impulse, Kräfte und Energie zu berechnen. Dabei stellt sich heraus, dass  $\varphi$  die Rolle des Gravitationspotentials spielt und in dem Produkt  $m\varphi$  direkt in die Trägheit von Massenpunkten eingeht. Da  $\varphi$  mit zunehmenden Massen abnimmt, folgt, dass auch die träge Masse eines Körpers abnimmt, je mehr Massen in seiner Umgebung angesammelt werden. Dies ist der für Einstein wesentliche Unterschied zwischen der Nordström-Theorie und der Entwurf-Theorie.

Die verallgemeinerte Poissongleichung  $-\chi \sum T_{\sigma\sigma} = \varphi \square \varphi$  stellt die allgemeine Gleichung für das Gravitationsfeld nach Nordström dar. Einstein zeigte, dass Nordströms Ansatz mit den vier genannten Postulaten im Einklang steht und betonte abschließend:

„Unbefriedigend bleibt lediglich der Umstand, dass nach dieser Theorie die Trägheit der Körper beeinflusst, aber doch nicht verur-

---

<sup>165</sup> Oft wird die Rolle Plancks in der Geschichte der Relativitätstheorie vergessen, hier deutete Einstein die Leistung Plancks an, die relativistischen Bewegungsgleichungen inklusive des relativistischen Impulses 1906 zuerst abgeleitet zu haben. Siehe zum Beispiel: [Simonyi 1990, S. 407, 409] und Fußnote 15 von [Collected Papers 4, Doc 17].

sacht erscheint<sup>166</sup>.

Die Überleitung zu seinen eigenen Ansätzen begann Einstein mit dem Beispiel des Eisenbahnwagens aus der gewöhnlichen Relativitätstheorie: Dem Fahrgast im Eisenbahnwagen mit verhängten Abteiffenstern wird es nach dem Relativitätsprinzip der gleichförmigen Bewegung nicht möglich sein zu entscheiden, ob und mit welcher Geschwindigkeit die Eisenbahn fährt, oder ob sie steht. Da aber der Fahrgast einen Ruck spürt, sobald sich die Bewegung des Zuges ändert, wird man wohl schließen, es gäbe „keine Relativität der beschleunigten Bewegung“.

Anhand des bekannten Beispiels der beiden im Kasten eingesperrten Physiker zeigte Einstein auf, dass dieser Schluss verfrüht ist. Beide Physiker können sich nicht einigen, ob der Kasten in einem homogenen Schwerfeld ruht oder ob er konstant beschleunigt ist. Es scheint kein Kriterium zu geben, das entscheiden kann, welcher Physiker Recht hat. Dieser Schluss von Einstein beruht auf der Annahme der Identität von träger und schwerer Masse und Eötvös' Experimente<sup>167</sup> sprechen für dieses Postulat.

Nach dieser Überlegung bietet sich eine Ausdehnung des Relativitätsprinzips auf beschleunigte Bezugssysteme an:

„Vom mathematischen Standpunkt aus kommt dies darauf hinaus, dass wir eine Kovarianz der die Naturgesetze ausdrückenden Gleichungen nicht nur gegenüber linearen orthogonalen Substitutionen fordern, sondern auch noch bezüglich weiterer, insbesondere nicht linearer Transformationen, denn nur nicht lineare Substitutionen entsprechen einem Übergange auf relativ beschleunigte Systeme.“<sup>168</sup>

Da es allerdings keine Anhaltspunkte gibt, bezüglich welcher Substitutionen die Kovarianz gefordert werden soll

„zeigte es sich, dass es möglich und zweckmäßig ist, die Kovarianz der Gleichungen zunächst bezüglich beliebiger Substitutionen zu fordern.“<sup>169</sup>

Einstein bemerkte noch, dass es im Allgemeinen nicht möglich ist, eine Transformation ausfindig zu machen, die die Gravitationsfelder beliebiger Massenverteilungen (zum Beispiel das Schwerfeld der Erde) wegtransformiert, genauso wie es unmöglich ist, im Rahmen des Relativitätstheorie der gleichförmigen Bewegung ein System mehrerer Massen mit verschiedenen Geschwindigkeiten auf

---

<sup>166</sup> [Einstein 1913, S. 1254]

<sup>167</sup> Dazu siehe zum Beispiel [Simonyi 1990, S. 421 f].

<sup>168</sup> [Einstein 1913, S. 1255]

<sup>169</sup> [Einstein 1913, S. 1255]

Ruhe zu transformieren.<sup>170</sup> Damit deutete Einstein an, dass der Riemannsche Krümmungs-Tensor eine Invariante ist, die in der Umgebung der Erde nicht Null ist und nicht auf Null transformiert werden kann.

Aus der Hamiltonschen Gleichung  $\delta(f d\tau) = 0$  folgt<sup>171</sup> dann nach einer beliebigen Transformation  $\delta(f ds) = 0$ , wobei  $ds^2 = g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu$  gilt und  $(x_1, x_2, x_3, x_4)$  die neuen Koordinaten nach der Transformation sind. Auch hier kann man eine Hamiltonsche Funktion  $H = -m \frac{ds}{dt}$  finden, so dass  $\delta(f H dt) = 0$  gilt. Betrachtet man das System als „ruhend“, so übernehmen die  $g_{\mu\nu}$  die Rolle des Gravitationsfeldes. Weil die  $g_{\mu\nu}$  einen symmetrischen Tensor (2. Stufe) bilden, besteht das Gravitationsfeld bei Einstein aus 10 Komponenten. Die Größe  $ds$  („Betrag des Linienelementes“) spielt als Invariante unter beliebigen Koordinatentransformationen eine besondere Rolle. So sind zum Beispiel Linienelemente  $(dx_1, dx_2, dx_3, dx_4)$  mit  $ds = 0$  mögliche Bahnen für Lichtstrahlen. Für fehlende Gravitationsfelder gilt die gewöhnliche Relativitätstheorie, dann hat in solchen Bezugssystemen das  $g_{\mu\nu}$  die Form

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Aus diesen Überlegungen folgt, dass die Lichtgeschwindigkeit  $c$  keine Konstante mehr ist und sogar von der Ausbreitungsrichtung abhängen kann.<sup>172</sup> Abweichungen von der gewöhnlichen Relativitätstheorie erkennen wir in Experimenten deshalb nicht, da in den uns zugänglichen Regionen die  $g_{\mu\nu}$  kaum von denen der gewöhnlichen Relativitätstheorie abweichen.

Es sei abschließend darauf hingewiesen, dass Einstein hier die Gleichheit der trägen und schweren Masse nutzte, um seine Schritte im Hinblick auf die Erweiterung der Transformationsgruppe zu begründen und nicht um zwischen verschiedenen Theorien zu unterscheiden. Dazu verwendete er zum einen die SRT im Korrespondenzprinzip und zum anderen das Zustandekommen der Trägheitserscheinungen.

#### 4.2.2 Die Wien-Diskussion

Wie oben angedeutet, schien Mie darüber verärgert, dass Einstein die Ansätze zu den Gravitationsgleichungen der Theorie der Materie in seinem Vortrag nicht einmal erwähnte:

---

<sup>170</sup> *ibid.*

<sup>171</sup> [Einstein 1913, S. 1256]

<sup>172</sup> *ibid.*

„Meine Theorie steckt allerdings in einer umfangreicheren Arbeit über die Theorie der Materie überhaupt, und deshalb sind meine Untersuchungen wohl Herrn Einstein entgangen (Einstein: Nein, nein). Dann hat er sie wohl noch nicht gelesen, sonst hätte er sie wohl erwähnt.“<sup>173</sup>

Daraufhin stellte Mie die „Vorteile“ seiner Theorie gegenüber der Einsteinschen Theorie dar, die nach Mie vor allem aus der Übersichtlichkeit und dem sehr allgemeinen Ansatz, der noch mehrere Spezialfälle zulässt, bestehen. Einstein gab zu, dass er

„die Miesche Theorie nicht so genau gelesen [habe], als vielleicht gut gewesen wäre,“<sup>174</sup>

und bemerkte, dass er Mies Theorie in diesem Vortrag nicht behandeln konnte, da diese nicht die Äquivalenz von träger und schwerer Masse erfüllt und es unlogisch gewesen wäre, diese Theorie trotzdem zu behandeln, da sie den ausdrücklich geforderten Prinzipien widerspricht.

Im Wesentlichen kritisierte Mie in dieser Diskussion drei Punkte an Einsteins Theorie und Vortrag. Diese waren:

- Eine falsche geschichtliche Einordnung der Gravitationstheorien von Abraham und Nordström,
- die Einstein-Grossmann-Theorie erfüllt ebenfalls nicht die Äquivalenz von träger und schwerer Masse, sowie
- das Prinzip der allgemeinen Relativität macht keinen physikalischen Sinn und führt zu Widersprüchen.

Der erste Kritikpunkt basiert auf einem schlichten Missverständnis. Einstein sprach in seinem Vortrag von Nordströms zweiter Theorie von 1913, während Mie glaubte, dass es um die erste Theorie von Nordström aus dem Jahre 1912 ginge. Die erste Nordström-Theorie hat in der Tat Ähnlichkeiten mit Abrahams Gravitationstheorie und somit ist Mies Kritik unter diesem Missverständnis nachvollziehbar; in Mies Artikel aus dem Frühjahr 1914 stellte er dieses klar<sup>175</sup>. Dieses Missverständnis macht deutlich, dass selbst die in der Gravitationstheorie aktiven Wissenschaftler sich schwer taten den Überblick über den aktuellen Stand der

---

<sup>173</sup> [Einstein/Mie 1913, S. 1262]

<sup>174</sup> *ibid.* S. 1263

<sup>175</sup> Siehe Fußnote 3 in [Collected Papers 4, Doc. 16] und Mies Fußnote 3 in seinem Artikel [Mie 1914b, S. 174].



Dinge zu behalten und die Bedeutung ihrer Argumente selbst nicht vollständig durchschaut haben. Ansonsten hätte Einstein oder Mie in der Diskussion klar werden müssen, dass sie hier aneinander vorbei redeten.

Einsteins Anlass, die Miesche Theorie aufgrund des darin enthaltenen Unterschieds von träger und schwerer Masse nicht in Betracht zu ziehen, wurde von Mie ebenfalls kritisiert. Der Unterschied zwischen diesen beiden Größen liegt in Mies Theorie noch unter den Genauigkeiten, die damals die Experimente von Eötvös und deren Verfeinerungen durch Pekár und Fekete erreichten und somit sah Mie seine Theorie als nicht durch diese Ergebnisse widerlegt an. Allerdings behauptete er, dass auch Einsteins Theorie dieses Prinzip nicht exakt erfüllt:

„Wenn die Größen  $h_{\mu\nu}$  mit den Komponenten des Spannungsenergietensors  $[T_{\mu\nu}]$  identisch wären, so wären träge und schwere Masse prinzipiell identisch. Aber das ist keineswegs der Fall, die  $h_{\mu\nu}$  sind von den Komponenten des Spannungsenergietensors verschieden, und somit wird die schwere Masse nicht dem Energiegehalt des Körpers gleich, sondern das Verhältnis der beiden Massen hängt auch noch von anderen Größen, wie z. B. Geschwindigkeit, Temperatur ab. Auch Einstein erwähnt schon, dass das Verhältnis der schweren zur trägen Masse vom Gravitationspotential abhängt.“<sup>176</sup>

Mie interpretierte hier den Tensor  $h_{\mu\nu}$  als eine zur Dichte der *schweren* Masse analoge Größe, aus der dementsprechend die schwere Masse eines Körpers berechnet werden kann. Da sich nach der SRT die träge Masse aus der Gesamtenergie ergibt, folgt aus dem Spannungsenergietensor  $T_{\mu\nu}$  der entsprechende Wert der trägen Masse. Weshalb sich die Komponenten der beiden Tensoren unterscheiden sollen, machte Mie nicht deutlich, aber der Grund liegt in der Anwendung der SRT, nach der mit der Geschwindigkeit eines Körpers auch seine träge Masse erhöht wird. Zu dem letzten Satz aus Mies Zitat sollte angemerkt werden, dass Einstein dies nicht behauptet hatte. In dem Abschnitt über den Einfluss des Gravitationspotentials sprach Einstein nur von den Wirkungen auf die träge Masse und unterließ einen Verweis auf die schwere Masse.

Mies Kritik sollte in seiner nächsten Veröffentlichung vertieft werden, denn Einstein schien zu diesem Zeitpunkt kein Interesse an einer Diskussion über dieses Thema zu haben:

„Die Beantwortung der Behauptung, dass in meiner Theorie die Forderung der Äquivalenz der schweren und trägen Masse nicht erfüllt sei, ist wohl mit Vorteil einstweilen aufzuschieben, bis Herr Mie seine diesbezügliche Bedenken publiziert hat.“<sup>177</sup>

---

<sup>176</sup> [Einstein/Mie 1913, S. 1263]

<sup>177</sup> [Einstein/Mie 1913, S. 1264]

In der entsprechenden Publikation wird Mie auf diesen Punkt näher eingehen. In Abschnitt 4.2.3 werde ich darauf zurückkommen. Auf jeden Fall wird an diesem Punkt klar, dass Einstein sein Äquivalenzprinzip und dessen Bedeutung offensichtlich nicht deutlich genug dargestellt hat<sup>178</sup>.

Mies dritter Kritikpunkt war wohl der entscheidende. Seine Kritik bezüglich der physikalischen Bedeutung des Relativitätsprinzips begann in der Wien-Diskussion 1913 und wurde mindestens bis 1921 in verschiedenen Publikationen, Vorträgen und dem Briefwechsel mit Einstein aufrecht erhalten, modifiziert und mit Alternativvorschlägen ergänzt. Hier schien Mie zumindest zeitweise den wunden Punkt in Einsteins Argumentation getroffen zu haben, da für mehr als ein Jahr auch Einstein selbst aus verschiedenen Gründen an der allgemeinen Relativität zweifelte.

Um Mies Standpunkt zu verstehen wird es nötig sein, längere Abschnitte seines Beitrages zu betrachten:

„Herr Einstein hat [...] das, wie mir scheint, sehr interessante Prinzip einer allgemeinen Relativität postuliert. Allerdings ist dieses Prinzip in der vorliegenden Theorie ja noch nicht erfüllt, aber es ist trotzdem wohl von Interesse, es für sich einmal zu diskutieren. Mir ist nicht klar geworden, was es eigentlich physikalisch bedeuten soll.“<sup>179</sup>

Einstein und Grossmann haben es in ihrer Entwurf-Theorie nicht geschafft, die allgemein kovarianten<sup>180</sup> Grundgleichungen zu finden und führten dies auf die Erhaltungssätze für Energie und Impuls zurück, die eine Spezialisierung der Koordinatensysteme zur Folge haben sollten. Somit konnte Mie mit seiner Bemerkung andeuten, dass Einsteins Theorie nicht den eigenen Maßstäben gewachsen war. Dieser Punkt machte auch Einstein selbst zu schaffen und er suchte nach einer Begründung für diese Mängel, die er in den Tagen nach der Diskussion gefunden zu haben glaubte. In Einsteins Korrespondenz tauchen die Hinweise auf das Lochargument zuerst auf. Das Lochargument wird schließlich in einer Ergänzung zur Entwurf-Theorie am 30. Januar zuerst veröffentlicht und ist ebenfalls in der Antwort auf Mies Veröffentlichung Mitte Februar 1914 enthalten. Das Lochargument scheint zu begründen, dass die Forderung der allgemeinen Kovarianz mit dem Kausalitätsprinzip nicht in Einklang zu bringen ist.

Mie suchte allerdings nach einer anschaulichen Begründung für oder besser gegen

<sup>178</sup> Dazu siehe Abschnitt (3.3) und [Norton 1985].

<sup>179</sup> Dieses und die folgenden Zitate stammen aus der Passage [Einstein/Mie 1913, S. 1264].

<sup>180</sup> Die Begriffe *allgemeine Kovarianz* und *allgemeine Relativität* können in sofern gleichbehandelt werden, dass der erste Begriff sich auf mathematische Eigenschaften der Gleichungen bezieht, die mit den gleichberechtigten Koordinatensystemen, also der allgemeinen Relativität, korrespondieren.

das allgemeine Relativitätsprinzip. Dazu vermischte er Elemente des Äquivalenzprinzip für konstante Beschleunigungen mit dem allgemeinem Relativitätsprinzip:

„Ich habe eben in seinem Vortrag Herrn Einstein so verstanden, als ob er eine Machsche Idee weiter verfolgen wollte, wonach es auch nicht möglich sein dürfte, die Beschleunigungen absolut nachzuweisen. Gegen eine solche Auffassung des verallgemeinerten Relativitätsprinzips muss man als Physiker sehr schwerwiegende Bedenken erheben. [...] Man denke sich, man fahre in einem Eisenbahnwagen, der gegen die Außenwelt abgeschlossen ist. Man wird in diesem Wagen gerüttelt und geschüttelt, und diese Kraftwirkungen [...] pflegt man zu erklären als Trägheitswirkungen, infolge der unregelmäßigen Schwankungen des Wagens. Das allgemeine Relativitätsprinzip in der jetzt zu besprechenden Auffassung würde nun behaupten, dass es möglich sei, ein System gravitierender Massen anzunehmen, das unregelmäßige Bewegungen um den als ruhend gedachten Eisenbahnwagen herum ausführt und das so auf unsern Körper dieselben Wirkungen hervorruft, die wir für Trägheitswirkungen halten. [...] Ich glaube also, dass die hier besprochene Auffassung des verallgemeinerten Relativitätsprinzips keinen physikalischen Sinn hat.“

Mies Argument besteht im Wesentlichen aus zwei Punkten. Zum einen enthält es einen Appell an die physikalischen Erfahrungen, nach denen beschleunigte Bewegungen wirklich nachweisbar sind. Die gegensätzliche Meinung Einsteins umschrieb Mie mit „Machscher Idee“, wobei die Anspielung an Mach aus Einsteins Vortrag entnommen wurde.

Zum anderen übertrug Mie Aussagen des Äquivalenzprinzips auf nicht konstante Beschleunigungen um eine absurde Situation herzustellen, in der sich eine merkwürdige Konstellation von Körpern um den Zug herum bewegt, welche die entsprechenden Kräfte verursacht.

Es ist erstaunlich, dass Einstein diese Auffassung nicht kritisierte und praktisch unkommentiert im Raum stehen ließ. In der Niederschrift der Diskussion ist vermerkt, dass Einsteins Antwort auf diese Kritik nachträglich korrigiert wurde:

„Nach meiner Theorie ist das Relativitätsprinzip in diesem allgemeinsten Sinne ebenfalls nicht erfüllt. Die Erhaltungssätze führen zu einer weitgehenden Spezialisierung des Bezugssystems, wie ich im Vortrage ausgeführt habe.“

Einsteins Zurückhaltung kann erklärt werden, wenn man bedenkt, dass ihm zu dieser Zeit die Probleme seiner Theorie bewusst wurden: Ihm war klar, dass die

angegebenen Gravitationsgleichungen nur für lineare Transformationen kovariant sind und somit der gesamten Theorie der Boden entzogen war. Er grübelte sogar über die Gründe für diesen Mangel und in der Zeit nach der Wien-Versammlung fand Einstein auch das Lochargument<sup>181</sup>, das ihn davon überzeugte, dass das Allgemeine Relativitätsprinzip in Form der Allgemeinen Kovarianz dem Kausalitätsprinzip widerspricht.

### 4.2.3 „Hitze Polemik“

Die in Wien von Gustav Mie angekündigte Arbeit „Bemerkungen zu der Einsteinschen Gravitationstheorie“<sup>182</sup> erschien im Januar 1914 zweiteilig in der *Physikalischen Zeitschrift* etwa drei Monate nach der Naturforscherversammlung. An den hier angeführten Zitaten wird unter anderem der Tonfall des Artikels deutlich werden, der zum Teil verhöhrend wirkt. So wollte er an einer Stelle deutlich machen, dass die Einsteinsche Theorie nur ein Spezialfall einer auf Tensoren ausgedehnten allgemeinen Theorie der Materie ist<sup>183</sup>:

„Die Einsteinsche Gravitationstheorie ist ein Spezialfall der [...] dargestellten allgemeinen Theorie der Gravitation mit Tensorpotential. Sie fügt sich also in den Rahmen der gewöhnlichen Relativitätstheorie vollkommen ein.“<sup>184</sup>

Auch wenn Mie in dieser Arbeit über das allgemeine Relativitätsprinzip nur wenige Worte verlor, wird schnell klar, dass er dieses Prinzip als überflüssig ansah und durch seinen „Satz von der Relativität des Gravitationspotential“ ersetzen wollte:

„ein oberflächlicherer Leser [wird] durch die zitierten Aussprüche zu der falschen Ansicht geführt werden, dass es sich hier um einen Bruch mit der bisherigen Relativitätstheorie handle. [...] Die von mir angewandten Methoden haben den Vorteil, dass sie im Gegenteil zu den recht unübersichtlichen Formeln Einsteins klar durchsichtige Ausdrücke liefern. Auf diese Weise wird es dann möglich, die Einsteinsche Theorie in ihrem Wesen besser zu erfassen, insbesondere über

---

<sup>181</sup> Einstein fügte dem Wien-Vortrag eine entsprechende Fußnote an [Einstein 1913, S. 1257].

<sup>182</sup> [Mie 1914a] und [Mie 1914b]

<sup>183</sup> Mie folgert in dieser Arbeit ebenso, dass sich die erste Nordström-Theorie aus der Theorie der Materie ableiten lässt [Mie 1914b, S.174-175]. Das liegt schließlich daran, dass Mies Ansatz sehr allgemein ist und kaum konkrete Aussagen machen kann. Die zweite Theorie von Nordström enthält nach Mie Widersprüche.

<sup>184</sup> [Mie 1914a, S. 121]

die sog. Verallgemeinerung des Relativitätsprinzips Klarheit zu bekommen [...].“<sup>185</sup>

Mies Strategie in dieser Veröffentlichung war es, schon das Äquivalenzprinzip als falsches Prinzip zu entlarven. Desweiteren wollte er aufzeigen, dass die Formeln der Entwurf-Theorie dem Äquivalenzprinzip nur deshalb genügten, weil der Entwurf-Theorie weitere widersprüchliche Annahmen zugrunde lagen. Als Alternative zum Äquivalenzprinzip führte nach Mie das Prinzip der Relativität des Gravitationspotentials zu einer konsistenten Theorie. Damit ersparte sich Mie die Diskussion um den Sinn von Äquivalenzprinzip und Allgemeiner Relativität. Die erste Argumentationskette von Mie richtet sich gegen die mathematische Sprache der Entwurf-Theorie. Mie folgerte:

„Das Prinzip der Identität von schwerer und träger Masse ist auch in einer Theorie, in welcher das Gravitationspotential und die Dichte der schweren Masse vierdimensionale Tensoren sind, unmöglich.“<sup>186</sup>

Dazu nahm Mie an, dass beide Massen identisch sind und in einem ruhenden Koordinatensystem als einander entsprechende Komponenten zweier Tensoren vorkommen. Daraus leitete er einen Widerspruch ab, der ihn zu dem entsprechenden Schluss führte. Allerdings beruht dieser Schluss auf der Zuhilfenahme von Sätzen aus seiner Theorie der Materie, denn er benutzte explizit Sätze aus dem dritten Teil seiner Theorie. Jedoch beruht Mies Theorie auf der SRT, in der die träge Masse mit wachsender Geschwindigkeit zunimmt, während die schwere Masse stets mit der (trägen) Ruhemasse gleich bleibt. Da Mie in seiner Theorie die Trennung zwischen träger und schwerer Masse beibehielt, ist dort die schwere Masse eine Konstante. Die Ursache für den gefundenen Widerspruch liegt letztendlich in der Anwendung seiner eigenen Theorie in der Argumentation.

Zu der sich aufdrängenden Frage, weshalb Einstein trotzdem von der Äquivalenz der beiden Massen reden kann, hatte Mie zwei Bemerkungen. Die erste beruht auf Einsteins Formulierung dieses Postulates im Wien-Vortrag<sup>187</sup>: Dort forderte Einstein die Gleichheit von träger und schwerer Masse für *abgeschlossene Systeme*. Mie sagte, dass mit dieser Einschränkung die Identität auf mathematischem Wege künstlich erreicht wurde und mit diesem Satz das allgemeine Relativitätsprinzip eigentlich aufgegeben wurde. Seine zweite Kritik schließt sich an eine eingehende Untersuchung der „Nebenannahmen“ in Einsteins Theorie an. Mie kam schließlich zu dem Ergebnis, dass nur ein „innerer Widerspruch“ dieser Annahmen zu der Gleichheit von träger und schwerer Masse geführt hat. Diese Annahmen über

---

<sup>185</sup> [Mie 1914a, S. 115]

<sup>186</sup> [Mie 1914a, S. 118]

<sup>187</sup> Siehe zweites Postulat in 4.2.1.

den Charakter der Hamiltonfunktion  $H$  und den Energie-Impulssatz sollten nach Mie ebenso in seiner Theorie der Materie zu der Identität der Massen führen.

„Da indessen Herr Einstein so sehr großes Gewicht darauf legt, dass in seiner Theorie der Satz von der Gleichheit beider Massen wenigstens für abgeschlossene Systeme noch gelte, so sind wir genötigt, bei einer Besprechung seiner Theorie näher auf diesen Satz einzugehen.“<sup>188</sup>

Mie vermittelte den Eindruck, dass nach Einsteins Formulierung dieses Prinzips die Abgeschlossenheit der Systeme eine wichtige Rolle spielt, wobei ihm diese Formulierung nicht präzise genug ausfiel. Er kam zu dem Schluss, dass der „Satz, auf den Einstein, nachdem einmal das Prinzip der beiden Massen fallen musste, noch so großen Wert legt“<sup>189</sup> lediglich für spezielle Ausnahmen gültig sei. Demnach behauptete Mie, die träge und schwere Masse *zweier Körper* sei nur dann genau proportional, wenn sich *beide* Körper mit *gleicher* Geschwindigkeit im *gleichen* Schwerfeld bewegen. Ausserdem liegt die Ursache für diesen Satz nicht in den Hauptprinzipien von Einsteins Theorie:

„Der Satz von der Gleichheit der beiden trägen Massen abgeschlossener Systeme ist nicht etwa eine Konsequenz der beiden Hauptannahmen der Einsteinschen Gravitationstheorie, der Annahme eines Tensorpotentials und der Annahme einer eigentümlichen Transformationseigenschaft der Grundgleichungen, sondern er folgt aus den unwesentlichen, beiläufig gemachten Nebenannahmen der Theorie.“<sup>190</sup>

Letzendlich behauptete Mie weiter, dass die „eigentümliche Transformationseigenschaft“ als Hauptannahme getrost fortgelassen werden kann, wenn man nur seinen Satz von der Relativität des Gravitationspotentials an diese Stelle setzt. In seinen abschließenden Worten fasste Mie nochmals zusammen und betonte, dass sich Einsteins Verallgemeinerung nur auf lineare Transformationen beschränkt und somit nichts mit Beschleunigungen zu tun hat. Ausserdem kann das Äquivalenzprinzip aus den genannten Argumenten als hinfällig gelten und schließlich hatte Einstein selbst (in der entsprechenden Fußnote zur Wien-Diskussion) einen Satz angekündigt, der die Unmöglichkeit einer Verallgemeinerung des Relativitätsprinzips beweisen sollte.

Auch wenn Mies Argumentationen zum Teil auf Fehlern beruhen, kann man sagen, dass diese Arbeit bei den Lesern ihre Wirkung nicht verfehlen konnte.

---

<sup>188</sup> [Mie 1914a, S. 118]

<sup>189</sup> [Mie 1914b, S. 172]

<sup>190</sup> [Mie 1914b, S. 174]

Es gab zu dieser Zeit kaum Wissenschaftler, denen eine Erweiterung der Relativitätstheorie oder eine Modifikation der Gravitationstheorie notwendig erschien. Mit diesem Artikel erhielten Kritiker eine Bestätigung dafür, dass zumindest die komplizierten Arbeiten Einsteins auf diesem Gebiet ignoriert werden konnten. Man muss Mie auch in gewissen Punkten Recht geben, wenn er, zwar von einem anderen Standpunkt aus, die nicht durchgehaltene allgemeine Relativität sowie das Äquivalenzprinzip kritisierte. Denn Einstein hatte es ja tatsächlich nicht geschafft, die allgemeine Relativität durchzuführen und die Gravitationsgleichungen der Entwurf-Theorie genügten noch nicht einmal solchen Transformationen, die im Äquivalenzprinzip benötigt wurden.

Die Reaktion Einsteins auf die Mieschen Vorwürfe blieben erneut recht dürftig. Einstein konnte die Abhandlung von Mie noch rechtzeitig vor der Drucklegung einsehen und hatte somit die Möglichkeit direkt auf die Kritik zu antworten. Sein Artikel „Prinzipielles zur verallgemeinerten Relativitätstheorie und Gravitationstheorie“<sup>191</sup> folgt dementsprechend direkt nach Mies zweitem Teil der Kritik. In seiner Antwort ging Einstein allerdings kaum auf Mies Argumente ein, er stellte seine eigenen Argumente deutlicher dar:

„Den Anlaß zu den nachfolgenden Erörterungen gibt mir eine Kritik, welche Herr Mie in dieser Zeitschrift der von mir unter Beihilfe von Herrn Grossmann ausgearbeiteten Theorie widmet. Ich bin mit dem Ergebnis dieser Kritik nicht einverstanden und kann mich dem Eindruck nicht verschließen, dass Herr Mie meine theoretischen Absichten nicht richtig aufgefaßt hat. Gleichzeitig glaube ich aber, dass die Unvollkommenheit meiner bisherigen Darstellung der Hauptgedanken der Theorie an diesem Mißverständnis schuld trägt. Diese Unvollkommenheit rührt daher, dass ich in mancher Beziehung selbst noch nicht zu voller Klarheit gelangt war.“<sup>192</sup>

Einstein machte noch einmal deutlich, dass die Ablehnung bevorzugter Bezugssysteme zumindest zu einer Verallgemeinerung der Bewegungsgleichungen führt. Den Vorwurf, keine allgemeine Kovarianz für die Feldgleichungen erreicht zu haben, begegnete Einstein mit zwei Argumenten, die belegen sollten, dass allgemeine Kovarianz überhaupt nicht erreichbar war: Zum einen ließ sich kein Energie-Impulserhaltungssatz in allgemein kovarianter Form formulieren und zum anderen schien das Lochargument einen Widerspruch zum Kausalitätsgesetz zu liefern.<sup>193</sup>

Ein kurzer Abschnitt wird der Identität von schwerer und träger Masse gewidmet.

---

<sup>191</sup> [Einstein 1914a]

<sup>192</sup> [Einstein 1914a, S. 176]

<sup>193</sup> [Einstein 1914a, S. 178]

Die Kritik Mies bezüglich der vielen Nebenannahmen lehnte Einstein gänzlich ab. Er habe in diesem Artikel dargestellt, wie man ohne zusätzliche Annahmen zu den Feldgleichungen der Entwurf-Theorie gelangen kann und Mies Behauptungen stützen sich nur auf die Verwendung von Forderungen aus der gewöhnlichen Relativitätstheorie:

„In dieser Weise betrachtet, hat die von mir vertretene Theorie tatsächlich eine geringe Daseinsberechtigung! Ich hoffe aber, durch die vorliegende Betrachtung meine Auffassungsweise klar gemacht zu haben.“<sup>194</sup>

Ein weiterer Artikel zur Verteidigung seiner Positionen wurde von Einstein im Mai 1914 in der Zeitung *Scientia* veröffentlicht. Im Vorfeld gab es in dieser Zeitung Kritik von Brillouin und Abraham, denen Einstein eine Meinung der „Anhänger der neuen theoretischen Richtung“<sup>195</sup> gegenüberstellen wollte. Dieser Artikel kommt fast ohne mathematischen Formalismus aus und schlägt einen gedanklichen Bogen von der gewöhnlichen zur allgemeinen Relativitätstheorie. Dabei steht wiederum die Rolle der Masse und hierbei besonders die Identität von schwerer und träger Masse im Vordergrund. Bei dieser Gelegenheit sagte Einstein deutlich, dass mit Mies Grundhaltung zur Identität beider Massen eine solche Theorie tatsächlich bedeutungslos wäre, aber Einstein ging nun einmal davon aus. Nachdem die Bedeutung der Gleichheit beider Massen herausgestellt wurde, wird Mies Theorie erwähnt als eine, die diesem Prinzip widerspricht und merkwürdige Resultate zum Ergebnis hat:

“Die Theorie [...] von Mie [widerspricht] der Forderung der Gleichheit der trägen und schweren Masse abgeschlossener Systeme. Nach letzterer Theorie würde durch Erwärmen eines Körpers die *träge* Masse desselben nach Massgabe des Energiezuwachses *vergrössert*, nicht aber die schwere Masse; letztere würde bei einem Gase mit steigender Temperatur sogar abnehmen.“<sup>196</sup>

Für Einstein war die Sache einfach: Mie nahm den falschen Standpunkt ein. Wie die vorigen Zitate und das folgende zeigen, sah Einstein als Hauptursache der Probleme und Verwirrungen, die andere mit seiner Theorie, besonders mit der Forderung nach der allgemeinen Kovarianz hatten, eine Unklarheit in seiner Ausdrucksweise. Hier bezog sich Einstein wahrscheinlich auf die Tatsache, dass die allgemeine Kovarianz für ihn offensichtlich nicht mehr erfüllt werden kann, sie aber trotzdem einen zentralen Grundpfeiler in der Theorie bildet. Trotz der

---

<sup>194</sup> [Einstein 1914a, S. 179]

<sup>195</sup> [Einstein 1914b, S. 337]

<sup>196</sup> [Einstein 1914b, S. 343]



eingehenden Kritiken, die Einstein teils amüsierten, schien er darüber erfreut zu sein, dass sich überhaupt Kollegen mit seiner Theorie befassten, wie zwei Briefe an Erwin Freundlich und Heinrich Zangger aus dem Februar 1914 zeigen:

„Ganz neuerdings hat Mie eine recht hitzige Polemik gegen meine Theorie verfasst, aus der die Unzulänglichkeiten des früheren Standpunktes erst recht deutlich herausleuchten. Ich freue mich darüber, dass die Fachgenossen sich überhaupt mit der Theorie beschäftigen, wenn auch vorläufig nur in der Absicht, dieselbe totzuschlagen.“<sup>197</sup>

„[...] in den letzten Tagen eine Antwort auf eine Abhandlung von Mie, durch die meine Gravitationstheorie mausetot geschlagen werden sollte. Ich freue mich, dass die Sache doch wenigstens mit der erforderlichen Lebhaftigkeit aufgegriffen wird. Die Kontroversen machen mir Vergnügen. Figaro-Stimmung: ‘Will der Herr Graf ein Tänzlein wagen? Er solls mir sagen! Ich spiel ihm auf’.“<sup>198</sup>

## 4.3 Geadelt: Der Briefwechsel Mie - Einstein

### 4.3.1 Vorbemerkungen

In den Jahren nach der Veröffentlichung von Einsteins Übersichtsartikel über die allgemeine Relativitätstheorie im Frühjahr 1916 nahm die Zahl der Wissenschaftler zu, die sich ernsthaft mit der Relativitätstheorie befassten und zu deren Entwicklung beitrugen. Gustav Mie gestand ein, dass Einsteins Theorie nun doch diejenige sein muss, die der Natur am nächsten kommt. In den Wolfskehl-Vorträgen 1917 sagte er zum Beispiel:

„Auf dieses [...] Prinzip hat Einstein eine wundervolle Theorie der Gravitation aufgebaut, die von Hilbert in interessanter Weise beleuchtet worden ist, und die man wohl als die Lösung des Rätsels von der Gravitation anzusehen hat. Die Theorie der Materie wird die Gravitation nun einfach in der von Einstein gegebenen Fassung aufnehmen müssen, und in der Tat hat Hilbert nachgewiesen, dass dies ohne weiteres möglich ist.“<sup>199</sup>

Und an Einstein schrieb Mie in seinem ersten Brief:

---

<sup>197</sup> Einstein an Freundlich, Januar 1914, [Collected Papers 8, Doc. 506].

<sup>198</sup> Einstein an Zangger, Februar 1914 [Collected Papers 8, Doc. 507].

<sup>199</sup> [Mie 1917, S. 551]

„Von allen Gravitationstheorien ist nach meiner Überzeugung Ihre neue Theorie die einzige, die die Wissenschaft veranlassen wird, sie genau zu durchforschen [...] weil sie allein vollkommen durch Prinzipien bestimmt ist, die eine innere Kraft der Überzeugung in sich tragen.“<sup>200</sup>

Aus Briefen von Mie an Wilhelm Wien geht hervor, dass Mie seine Haltung zu Einsteins Theorie kurz nach der Veröffentlichung von Hilberts Grundlagen der Physik änderte<sup>201</sup>.

Aus dem Briefwechsel<sup>202</sup> zwischen Mie und Einstein sind 14 Briefe<sup>203</sup> (siehe *Tabelle 3*) enthalten, davon waren die ersten sechs aus dem Jahr 1917 relativ kurze Briefe, in denen kaum wissenschaftliche Themen diskutiert wurden. Hier ging es um Mies Einladung an Einstein, den Göttinger Vorträgen beizuwohnen und Einsteins Absage aus Gesundheitsgründen. Mit den vier Dezember-Briefen wurden verschiedene Artikel der beiden ausgetauscht, wobei die Initiative eindeutig von Einstein ausging. Er bat Mie um eine Übersendung der Abdrucke der Wolfskehlvorträge und schickte ihm als Gegenleistung seine eigenen Artikel über kosmologische Betrachtungen, über das Hamiltonsche Prinzip sowie eine quantentheoretische Arbeit<sup>204</sup>. Auf diese Informationsflut reagierte Mie mit den ersten Kommentaren zu Einsteins Arbeiten im Februar 1918, es folgten insgesamt fünf längere Briefe bis zum März 1918, in denen beide ausgiebig über verschiedenste Themen wie Parallelnaxiom,  $\lambda$ -Konstante, Deutung der Feldgleichungen, Bedeutung der allgemeinen Relativität oder bezogene Koordinatensysteme diskutierten. Diese Themen werden in den folgenden Abschnitten näher betrachtet. Einstein brach schließlich am 24. März die Diskussion per Post ab, da ein persönliches Treffen, vermutlich Ende März oder Anfang April in Einsteins Wohnung stattfinden sollte. Daraufhin gab es noch zwei Briefe von Mie an Einstein. In dem ersten reagierte er auf das Treffen und deutete an, dass er zeitweilig von Einstein überzeugt wurde, ihm aber in aller Ruhe erneute Zweifel aufkamen. Der letzte erhaltene Brief aus dem Jahre 1919 enthält Fragen zur Neubesetzung von Lehrstühlen sowie eine Andeutung der Berechnungen eines rotierenden Elektrons. Diese werden von Mie auf der Naturforscherversammlung 1920 in Bad Nauheim näher erläutert. Um den Überblick zu erleichtern wurde in der Diskus-

---

<sup>200</sup> [Collected Papers 8, Doc. 346]

<sup>201</sup> [Collected Papers 8, siehe Fußnote 2 zu Doc. 346]

<sup>202</sup> Es gibt von Jozsef Illy einen interessanten Artikel zu diesem Briefwechsel, jedoch lag dort nicht der gesamte Briefwechsel vor und es konnte nicht zitiert werden. Es sind aber Anregungen für diesen Abschnitt aus Illys Artikel entnommen, siehe: [Illy 1992].

<sup>203</sup> Der Brief vom 29. Juni ist zu finden im Albert Einstein Archive of the Hebrew University of Jerusalem unter der Nummer 17 226.

<sup>204</sup> Die Arbeiten sind: „Näherungsweise Intergration...“ (Doc. 32), „Zur Quantentheorie der Strahlung“ (Doc. 38), „Hamiltonsches Prinzip...“ (Doc. 41) und die „Kosmologischen Betrachtungen“ (Doc. 43) in: [Collected Papers 6].

Datum	Absender	Quelle
30. Mai 1917	Mie	Doc. 346 in [Collpap 8]
02. Juni 1917	Einstein	Doc. 348 in [Collpap 8]
Mies Vorlesungen	in Göttingen	vom 5. - 7. Juni 1917
14. Dezember 1917	Einstein	Doc. 407 in [Collpap 8]
17. Dezember 1917	Mie	Doc. 410 in [Collpap 8]
22. Dezember 1917	Einstein	Doc. 416 in [Collpap 8]
29. Dezember 1917	Einstein	Doc. 421 in [Collpap 8]
05. Februar 1918	Mie	Doc. 456 in [Collpap 8]
08. Februar 1918	Einstein	Doc. 460 in [Collpap 8]
17. Februar 1918	Mie	Doc. 465 in [Collpap 8]
22. Februar 1918	Einstein	Doc. 470 in [Collpap 8]
21. März 1918	Mie	Doc. 488 in [Collpap 8]
24. März 1918	Einstein	Doc. 493 in [Collpap 8]
Treffen in Einsteins	Wohnung Ende	März oder Anfang April 1918
06. Mai 1918	Mie	Doc. 532 in [Collpap 8]
29. Juni 1919	Mie	Einstein Archive 17 226

Tabelle 3: Übersicht des Briefwechsels zwischen Albert Einstein und Gustav Mie

sion des Briefwechsels versucht, eine thematische Trennung zu erreichen. Da die verschiedenen Themen oft nahe beieinander liegen und einzelne Argumente der Briefpartner verschiedenen Bereichen zuzuordnen sind, kann diese Trennung keine exakte sein und Wiederholungen waren nicht auszuschließen.

#### 4.3.2 Parallelenaxiom, $\lambda$ -Konstante und relativistischer Standpunkt

In den Wolfskehlvorträgen schlug Mie ein Verfahren vor, ein Koordinatensystem in der vierdimensionalen Raumzeit anzulegen. Dabei deutete er an, dass in seinen Augen die Welt im wesentlichen euklidisch<sup>205</sup> ist und nur in der Nähe von Materie lokale Krümmung vorweist. Aufgrund der Eigenschaft des Gravitationspotentials, die Geometrie des Raumes zu ändern, kam Mie in den Wolfskehlvorträgen zu einem abgewandelten Bild der Materie:

„Es wird sich ergeben, dass nur in gewissen großen Gebieten der Welt die Minkowskische Geometrie gilt, dass jedoch an vielen Stellen

<sup>205</sup> In der SRT nennt man die Geometrie des Raumes *euklidisch*, während die vierdimensionale Raum-Zeit eine *pseudoeuklidische* Geometrie hat. Die pseudoeuklidische Geometrie wird auch mit *Minkowski Geometrie* bezeichnet.

größere oder kleinere Abweichungen von ihren Gesetzen zu erkennen sind. Von diesen Stellen sagen wir, dass sie in der Nähe materieller Körper seien.“<sup>206</sup>

Demnach bilden die unteilbaren Elementarteilchen unter dem Gesichtspunkt der Theorie der Materie Welt-Röhren in der vierdimensionalen Raumzeit, deren Existenz man bei geeigneten Messungen durch große Abweichungen von der Euklidizität des Raumes in der Nähe der Materie nachweisen könnte, sofern nur die Messungen genau genug durchgeführt werden.

### Parallelnaxiom und $\lambda$ -Konstante

Nicht Mies Ansicht über die Materie, sondern seine Annahme, dass die Welt im wesentlichen euklidisch sei, wird von Einstein zuerst kritisiert. Nachdem er Mies Vorträge gelesen hatte ging er in seinem Brief vom 22. Dezember 1917 auf diese Vorstellungen ein:

„Unsere noch verbleibenden Meinungsdivergenzen sind relativ unbedeutend. Der Hauptunterschied besteht darin, dass ich nicht an die „ebene Grundgestalt“ des Weltkontinuums glaube. [...] Ich glaube aber nicht, dass die Welt im Wesentlichen leer und eben sei und nur im Endlichen von Materie erfüllt bei unendlicher Ausdehnung. Das riecht nach geozentrischer Auffassung. [...] Mit Ihren Ansichten über die Materie stimme ich überein.“<sup>207</sup>

Diese Auffassung hatte sich bei Einstein in der Folge des Briefwechsels 1916/17 mit dem holländischen Astronomen Willem de Sitter herausgebildet:<sup>208</sup> In der Diskussion mit De Sitter hatte Einstein erfahren, dass sich seine Vorstellung von ausschließlich durch Materie induzierter Trägheit nicht konsequent durchführen ließ, sofern man die Raum-Zeit an sich für grundsätzlich euklidisch hielt. Daraufhin überarbeitete Einstein seine ursprünglichen Feldgleichungen und fügte ihnen, ohne die allgemeine Kovarianz zu verlieren, das sogenannte „ $\lambda$ -Glieder“ hinzu. Diese Änderung wurde zu Beginn des Jahres 1917 in den „Kosmologischen Betrachtungen“ veröffentlicht, die Einstein jetzt auch an Mie schickte.

Die Wahl der Formulierung „geozentrische Auffassung“, mit der Einstein Mies Auffassung umschrieb, kann man mindestens in zwei Richtungen deuten: Einstein kann hier an die von De Sitter ausgehende Kritik, Randbedingungen entsprächen der Einführung eines absoluten Raumes gedacht haben. Aber Einstein hatte kurz

---

<sup>206</sup> [Mie 1917, S. 600]

<sup>207</sup> [Collected Papers 8, Doc. 416]

<sup>208</sup> Zu diesem Briefwechsel siehe: [Collected Papers 8, S. 351-357].

vor diesem Brief Mies Wolfskehl-Vorlesungen gelesen, in denen Mie andeutete, dass die ART in Einsteins Sinn die Erde als ruhend, jedoch mit komplizierten „fingierten Feldern“ umgeben ansehen kann. Mie schrieb dazu:

„Und so wird man wohl bei der Bevorzugung des ‚Kopernikanischen‘ Koordinatensystems vor dem ‚Ptolemäischen‘ bleiben müssen.“<sup>209</sup>

Nach mehr als einem Monat bezog Mie in seinem ersten längeren Brief Stellung zu den kosmologischen Betrachtungen. Er stellte die Einführung des  $\lambda$ -Gliedes im Zusammenhang mit dem Parallelenpostulat als wichtigstes Resultat dieses Artikels dar:

„Ich sehe das wichtigste Resultat dieser Untersuchung in dem Satz: ‘Das Parallelenaxiom ist unabhängig von dem Axiom der allgemeinen Transformierbarkeit der Grundgleichungen der Physik.’ Dieses Resultat finde ich ganz außerordentlich interessant. Allerdings muss ich gestehen, dass ich trotzdem persönlich keine Neigung spüre, das Parallelen-Axiom [...] fallen zu lassen.“<sup>210</sup>

Mie zitierte hier nicht aus den kosmologischen Betrachtungen, mit den Anführungszeichen wollte Mie offensichtlich seine Erkenntnis hervorheben. Er hat den Schluss gezogen, dass ein von Null verschiedenes  $\lambda$  für ein sphärisches und ein  $\lambda = 0$  für ein ebenes Universum steht. Da der Zusatzterm  $\lambda g_{\mu\nu}$  in den Feldgleichungen der ART nichts an der allgemeinen Kovarianz ändert, ist somit die Forderung  $\lambda = 0$  eine zusätzliche Voraussetzung in der Physik über die Geometrie des Raumes an sich. Mit dieser Annahme geht man davon aus, dass das Universum eben ist und Mie sah keinen Grund, diese Annahme fallen zu lassen und Einsteins Begründung für diesen Schritt schien für Mie nicht einsichtig zu sein:

„Was im Unendlichen in Raum und Zeit los ist, ist mir eigentlich ganz egal [...]. Grübeleien über diese Dinge können, wie Ihre Arbeit beweist, gewiss zu sehr interessanten Überlegungen einen Anstoß geben, aber zu entscheidenden Urteilen wird man sie wohl nicht hinzuziehen dürfen.“<sup>211</sup>

---

<sup>209</sup> [Mie 1917, S. 598]

<sup>210</sup> [Collected Papers 8, Doc. 456]

<sup>211</sup> [Collected Papers 8, Doc. 456]

Einstein begründete die Einführung des Lambda-Terms gegenüber Mie in seinem Antwortschreiben mit der Forderung, dass es notwendig sei, „dass das Gravitationsfeld vollkommen bestimmt sei durch die Materie, was aber für die quasi-Euklidische Welt nicht zutrifft.“ Man benötigt demnach nicht-kovariante Grenzbedingungen im Unendlichen um eine Euklidische Welt zu erhalten, dies bedeutet letztendlich, dass „die metrischen Eigenschaften des Raum-Zeit-Kontinuums [...] im Wesentlichen durch diese nicht relativistischen Grenzbedingungen, nicht durch die *Körper* bestimmt“ sind<sup>212</sup>. Einstein erklärte weiter, eine solche Euklidische Welt wäre im wesentlichen leer und hätte einen Mittelpunkt, in diesem Sinne sprach Einstein schon im Dezember von einer „geozentrischen Auffassung“ Mies. Die  $\lambda$ -Hypothese würde die eben genannten Probleme vermeiden.

Hier reagierte Mie ähnlich wie De Sitter auf Einsteins Argumentation über die Zustände im Unendlichen. Der Astronom De Sitter führte 1917 die oben angesprochene Korrespondenz mit Einstein über kosmologische Konsequenzen der ART, in deren Verlauf zum Beispiel die berühmten Weltmodelle mit den Bezeichnungen „De Sitter Welt“ und „Einstein-“ oder „Zylinder-Welt“ aufgestellt wurden.

De Sitter mahnte 1917, mit solchen Extrapolationen über den metrischen Tensor im Unendlichen vorsichtig umzugehen und schrieb: „Wie die  $g_{\mu\nu}$  im Unendlichen von Raum oder Zeit aussehen, werden wir nie wissen“<sup>213</sup>, während es Mie gerade aus diesem Punkt gleichgültig war, wie es im Unendlichen zugeht. Mie ließ sich weiterhin nicht von Einsteins Standpunkt überzeugen, stellte aber die Bedeutung des  $\lambda$ -Terms unter einem weiteren Gesichtspunkt im übernächsten Brief am 21. März dar, demnach könnten die Gleichungen mit  $\lambda$  für die Erkenntnistheorie wichtig sein:

„Wir wissen alle, dass das Parallelenaxiom ein physikalischer Satz ist, [... es] steht so auf einer Stufe mit dem Relativitätsprinzip, dem Hamiltonschen Prinzip u. s. w. Es ist aber - wenigstens mir - bisher immer rätselhaft gewesen, wo eigentlich die Stelle ist, an welcher das Parallelen-Axiom in die physikalischen Grundgleichungen eintritt [...]. Das wird nun auf einmal anders, in Ihren neuen Gleichungen sieht man jetzt endlich einmal deutlich, in welcher Weise das Parallelen-Axiom in den der experimentellen Prüfung zugänglichen Grundgleichungen der Aetherphysik steckt.“<sup>214</sup>

<sup>212</sup> Beide Zitate und die Hervorhebung aus: Einstein an Mie, 8. Februar 1918, [Collected Papers 8, Doc. 460].

<sup>213</sup> „How the  $g_{\mu\nu}$  are at infinity of space or of time, we will never know.“ [De Sitter 1917, S. 1217], für weitere Informationen siehe auch: [Röhle 2000].

<sup>214</sup> Mie an Einstein, 21. März 1918, [Collected Papers 8, Doc. 488].

Für Mie war es eine erfreuliche Erkenntnis, nun experimentell den Nachweis angehen zu können, das Parallelenaxiom zu überprüfen. Dabei war die Sachlage für ihn recht simpel: „Ist er [der  $\lambda$ -Koeffizient] Null, so gilt das Parallelenaxiom, ist er von Null verschieden, so hat der Raum eine konstante Krümmung“<sup>215</sup>. Einsteins Gründe perlten an Mie ab und er bevorzugte bis zu einem eventuellen Beweis des Gegenteils die euklidische Welt. Solange diese Entscheidung nicht getroffen war spielte für Mie das Parallelenaxiom nicht nur die Rolle eines geometrischen Axioms sondern die eines echten physikalischen Axioms, wie zum Beispiel das Hamilton-Prinzip.

In seinem vorletzten Brief an Mie griff Einstein nochmals den Vergleich der beiden berühmten Weltbilder auf und mahnte sehr deutlich: „Der Glaube an den Euklidischen Charakter der Welt entspricht ganz dem Glauben des Altertums an die ebene Grundgestalt der Erdoberfläche.“<sup>216</sup> Insgesamt ging Einstein nirgends näher auf die tiefere Bedeutung des  $\lambda$ -Terms ein, ihm war mehr an den Gründen für dessen Einführung gelegen: „Sie sollten nicht sagen, dass ich die gekrümmte Welt vorziehe (der ebenen), sondern dass ich die mit Materie erfüllte Welt *der wesentlich leeren* vorziehe. Die Materie bedingt notwendig die Krümmung“<sup>217</sup> schrieb er an Mie, doch da Mies Meinung blieb, änderte sich Einsteins Feststellung vom Dezember, ihr Hauptunterschied sei der Glaube an die ebene Grundgestalt. Einstein warf Mie nun vor er stünde nicht auf dem relativistischen Standpunkt:

### Relativistischer Standpunkt

In seiner Einladung vom Mai 1917 deutete Mie an, dass er in der *Bedeutung* der allgemeinen Relativität zu einer anderen Auffassung gelangt ist und glaubte,

„dass diese allgemeine Transformierbarkeit [der Feld-Gleichungen] nicht vereinbar ist mit der Forderung einer wirklich vollendeten, in sich geschlossenen Theorie der physikalischen Ereignisse [...]“<sup>218</sup>

Dies deutete Einstein zuerst im Sinne seines Locharguments, dass er im Rahmen seiner Entwurf-Theorie ersann. Dort konnte er keine allgemein kovarianten Feldgleichungen aufstellen und kam mit dem Lochargument zu dem Schluss, die allgemeine Kovarianz verstoße gegen das Kausalitätsprinzip und allgemein kovariante Feldgleichungen können nicht existieren. Nun war Einstein gespannt, was Mie „zu dieser prinzipiell wichtigen Frage sagen werde“ und freute sich, dass Mie

---

<sup>215</sup> *ibid.*

<sup>216</sup> [Collected Papers 8, Doc. 470]

<sup>217</sup> Einstein an Mie, 8. Februar 1918, [Collected Papers 8, Doc 460].

<sup>218</sup> [Collected Papers 8, Doc. 346]

nun ebenfalls „den allgemeinen Relativitätsgedanken [...] als eine die Möglichkeiten stark einengende Hypothese [schätzte]“<sup>219</sup>.

Da Mie, wie eben gesehen, von Einsteins Argumenten zur Einführung der  $\lambda$ -Konstanten wenig beeindruckt war, stellte Einstein im Februar 1918 fest, dass Mie nicht auf dem „relativistischen Standpunkt steht“. Dies bezog Einstein wohl auf Mies Haltung zu den  $g_{\mu\nu}$  im Unendlichen und Einsteins Vorstellungen davon: Lehnt man die Feldgleichungen mit  $\lambda$ -Term ab, so favorisiert man ein ebenes Universum, in dem Einstein jedoch nur mit Randbedingungen an die  $g_{\mu\nu}$  zu konkreten Lösungen der Feldgleichungen kam. Diese widersprachen zum einen seinen Vorstellungen im Sinne des Machschen Prinzips und waren zum anderen nicht allgemein kovariant. Außerdem verursachten nun die nicht kovarianten Randbedingungen die Trägheitserscheinungen wesentlich, wie Einstein hervorhob. Da Einstein das Gefühl hatte, sich bisher nicht klar genug ausgedrückt zu haben, umschrieb er im Brief vom 8. Februar 1918 den relativistischen Standpunkt wie folgt:

„Das Verhalten (Fortsetzung des zeitl. Ablaufes der Zustände) eines jeden Naturkörpers ist derart, dass es durch seinen eigenen Zustand und den aller übrigen Körper eindeutig bestimmt ist (der Satz ist natürlich ohne momentane Fernwirkung zu interpretieren). Dabei sind unter ‚Naturkörper‘ nur die wahrnehmbaren Körper unserer Sinneswelt zu verstehen. [...] Eine andere Auffassung ist nicht relativistisch. (Dies hat schon Mach ganz klar erkannt.)

Wenn Sie nun diesen relativistischen Standpunkt nicht teilen, dann *begreife ich nicht im Geringsten, wieso Sie der allgemeinen Kovarianz-Forderung irgend welche Bedeutung beimessen*. Entweder man macht ernst mit der Hypothese, dass es in der Physik nur Relativbewegungen gibt [...] oder man führt den absoluten Raum als selbstständiges Glied in die Causalkonstruktion ein.“<sup>220</sup>

Hier benutzte Einstein eine interessante Formulierung, von der man annehmen könnte, dass es sich um das Kausalitätsprinzip handelt. Übersetzt man jedoch „das Verhalten eines jeden Naturkörpers“ mit „das Verhalten des  $G$ -Feldes“, so kommt man nahe an Einsteins spätere Formulierung des Machschen Prinzips heran, die er in seiner Antwort auf Kottlers Artikel<sup>221</sup> etwa einen Monat später veröffentlichte. Auch Mie schien diesen Satz ähnlich zu deuten, denn er antwortete im folgenden Brief, dass er, wüsste er es nicht besser, unter Einsteins

<sup>219</sup> Beide Zitate aus [Collected Papers 8, Doc. 348].

<sup>220</sup> [Collected Papers 8, Doc. 460]

<sup>221</sup> [Einstein 1918]



relativistischem Standpunkt in der eben zitierten Form das Kausalitätsprinzip verstehen müsste. Mie zeigte jedoch keine weiteren direkten Reaktionen auf Einsteins relativistischen Standpunkt und so umschrieb Einstein in seinem nächsten Brief (vom 22. Februar) erneut seine Sichtweise:

„Ich behaupte, dass dieser [der relativistische Standpunkt] folgende Auffassung verlangt bezüglich der Trägheit. Ist  $L$  die tatsächliche Bahn eines bestimmten frei beweglichen Körpers,  $L'$  eine davon abweichende mit denselben Anfangsbedingungen, so verlangt die relativistische Auffassung, dass die tatsächliche Bahn  $L$  gegenüber den vom logischen Standpunkte gleich möglichen Bahnen  $L'$  durch eine *Realursache* bevorzugt sei [...]. Als derartige Realursache kann aber [...] nichts anderes auftreten als die (relativen) Lagen und Bewegungszustände aller übrigen, in der Welt vorhandenen Körper. [...] Mathematisch bedeutet dies: Die  $g_{\mu\nu}$  müssen durch die  $T_{\mu\nu}$  vollständig bestimmt sein [...]"<sup>222</sup>

In dieser Formulierung wird deutlicher, inwiefern Einstein seine Auffassung als eine relativistische und nicht als eine kausale Auffassung sieht. Hier hat Einstein seine Aussage gegen Ende des Zitats zwar auf den Zusammenhang zwischen metrischen Tensor und Materietensor eingeschränkt, aber man kann sagen, dass sich Mie im Rahmen dieses Briefwechsels außer mit der Interpretation des relativistischen Standpunkts als Kausalitätsprinzip nicht für diese Bemerkungen Einsteins interessierte. Dies deckt sich mit seiner Meinung „Was im Unendlichen in Raum und Zeit los ist, ist mir eigentlich ganz egal“<sup>223</sup>, denn um das Machsche Prinzip ernsthaft anzuwenden, müsste das Universum als Ganzes bekannt sein, und hierüber wollte Mie offensichtlich nicht spekulieren. Vielleicht fühlte sich Mie auch an die Diskussion in Wien zurückerinnert: Dort verwies Einstein ebenfalls auf Mach und legte dar, dass Trägheit durch alle wahrnehmbaren Massen verursacht sei und schon damals lehnte Mie diese „Machschen Ideen“ ab, da er es als erwiesen ansah, dass Beschleunigungen absolut nachweisbar sind. Dies wirft natürlich die berechnete, von Einstein gestellte Frage auf, wieso Mie überhaupt von der Richtigkeit der ART überzeugt war und was Mie unter der allgemeinen Relativität verstand:

### 4.3.3 Bedeutung der allgemeinen Relativität

Was Mie vielmehr beschäftigte, war die Frage, was die allgemeine Relativität denn nun bedeuten soll. Man kann Mies Vorstellungen kurz vorwegnehmen, er

---

<sup>222</sup> Einstein an Mie, 22. Februar 1918 [Collected Papers 8, Doc. 470].

<sup>223</sup> [Collected Papers 8, Doc. 456]

stellte diese Sichtweise in seiner Einladung an Einstein dar: allgemeine Relativität bedeutete für Mie die allgemeine Transformierbarkeit der Gleichungen. Daran hatte Mie wenig auszusetzen und er akzeptierte diesen Ansatz als den richtigen Schritt zur Auffindung der Gravitationsgleichungen. Allerdings beinhaltete für Mie die allgemeine Transformierbarkeit nicht die völlige Gleichberechtigung aller möglichen Bezugssysteme. Die im letzten Abschnitt zitierten Andeutungen in Mies Eröffnungs-Brief zusammen mit der Zustimmung zur Theorie an sich ließen Einstein zuerst glauben, dass Mie seine Ideen akzeptiert habe.

### Der gesunde Menschenverstand vs. mathematische Sichtweise

Mit dem ersten Februarbrief musste Einstein jedoch feststellen, dass sich Mie in einer Hinsicht kaum weiterentwickelt hatte, denn dieser glaubte nach wie vor an bevorzugte Bezugssysteme und ersann verschiedene Beispiele, um die Absurdität dieser Gleichberechtigung bloßzustellen: In der Wien-Diskussion griff Mie Einsteins Eisenbahn auf und stellte sich vor, wie um die ruhende Bahn irgendwelche Massen verrückte Bewegungen ausführen, die schließlich dem Bahnkunden ein Rütteln vortäuschen.

Drei Jahre später, in den Göttinger Vorträgen, stellte Mie ein weiteres Beispiel vor: den sich schlängelnden Stab. Er erinnerte auch im Briefwechsel erneut daran und brachte dieses Beispiel noch in seiner populären Darstellung der ART von 1921 unter. Dabei stellte sich Mie einen geraden starren Stab vor. Man hat zuvor mittels Lichtstrahlen überprüft, dass der Stab nun wirklich gerade ist. Betrachtet man aber ein anderes, sich in der Zeit periodisch veränderndes Bezugssystem, so wird sich der Stab dort schlängeln und winden. Dazu müssten in diesem System jedoch Gravitationsfelder oder spezielle  $g_{\mu\nu}$ -Felder vorhanden sein, sofern man Einsteins Ansatz folgt. Und gerade diese Felder unterscheiden beide Systeme, diese Felder haben keine realen Massen als Quellen, weshalb Mie sie fingierte Gravitationsfelder nannte. Sie übernehmen nun die Rolle als Kausal-Ursache für das Verhalten des Stabes:

„Trotzdem hätte man genau wie in dem Poincaréschen System Unterschiede an verschiedenen Stellen der Welt, die nur durch mathematische Vorschrift hineinkommen und somit der Kausalität widersprechen. Um das recht drastisch zu zeigen, habe ich das Beispiel von dem sich windenden Stab genommen [...].“<sup>224</sup>

Mie rief ebenfalls das Einsteinsche Gedankenexperiment der zwei sich relativ zueinander drehenden Kugeln aus dem „Grundlagen-Artikel“ von 1916 ins Gedächtnis,<sup>225</sup> dort habe Einstein über den

---

<sup>224</sup> Mie an Einstein, 5. Februar 1918 [Collected Papers 8, Doc. 456].

<sup>225</sup> Siehe [Einstein 1916a, S. 771-772].

„mathematischen Zauber der Eigenschaft der allgemeinen Transformierbarkeit der physikalischen Grundgleichungen die hausbackene Logik aus den Augen verloren“<sup>226</sup>.

Mit diesen starken Worten versuchte Mie Einstein deutlich zu machen, dass Einsteins Vorstellung dem natürlichen Empfinden eines Physikers entgegensteht und Einstein durch die Mathematik davon abgelenkt wurde. Einstein stellte sich in dem angesprochenen Gedankenexperiment zwei Kugeln vor, die weit voneinander und weit von allen anderen Massen entfernt im Raum schweben. Diese Kugeln sollen sich nun relativ zueinander um ihre Verbindungsachse drehen und eine von ihnen zu einem Ellipsoid verformt sein. Hier sagte Einstein, der klassische Grund für die Verformung, die zweite Kugel drehe sich gegenüber dem absoluten Raum, sei unhaltbar. Statt dessen muss der wahre Grund des Unterschiedes ein anderes Verhalten der zweiten Kugel gegenüber den gesamten beobachtbaren Massen sein. Mie kritisierte diese Haltung:

„Denn man kann doch tatsächlich die beiden Koordinatensysteme  $S_1$  und  $S_2$  nur dann als ganz gleichwertig erklären, wenn man eine Welt, die mit einem willkürlich fingierten, nicht von Materie verursachten Gravitationsfeld gesetzmäßig erfüllt ist, für ebenso annehmbar ansieht, wie eine Welt, deren Raum-Zeit-Schema an sich gleichförmig ist, und in der nur von Materie verursachte Gravitationsfelder auftreten.“<sup>227</sup>

Wir sehen, dass sich Mies Kritik mit der Zeit in seiner Qualität veränderte. In Wien vertrat er noch den mit Laues früher Kritik<sup>228</sup> vergleichbaren „naiven“ Standpunkt, dass doch in den verschiedenen Systemen für die Gravitationsfelder Massen als Quellen vorhanden sein müssen, und es sei absurd, in dem einen System eine wirkliche Masse zu haben, in dem anderen aber nicht. In den Wolfskehlvorträgen umschrieb Mie diese Sichtweise treffend: Es sei undenkbar, „einen wirklichen materiellen Körper durch rein mathematische Operationen in die Welt hinein oder aus ihr heraus zu eskamotieren“<sup>229</sup>. Seine Kritik verfeinerte sich und bezog sich ab spätestens 1917<sup>230</sup> auf das Auftreten von „willkürlich fingierten Gravitationsfeldern“, die ohne echte Massen als Quellen vorhanden sind. Hier brachte Mie nun metaphysische Argumente in Spiel:

### Die Philosophen müssen ran

---

<sup>226</sup> [Collected Papers 8, Doc 456]

<sup>227</sup> [Collected Papers 8, Doc. 456]

<sup>228</sup> Siehe Abschnitt (3.3.3).

<sup>229</sup> [Mie 1917, S. 553]

<sup>230</sup> Siehe zum Beispiel: [Mie 1917, S. 598].

Dem Abschnitt über die beiden Kugeln in Mies Brief ging ein Abschnitt über Poincarésche Ideen voraus, der 1902 einen Euklidischen Raum mit Temperaturschwankungen näher betrachtete<sup>231</sup>: Die in dem Raum vorhandenen Temperaturschwankungen führen nach der gängigen Auffassung zu Längenänderungen der Maßstäbe, die bei der Vermessung des Raumes zu berücksichtigen sind. Stellt man sich jedoch auf den Standpunkt, die Temperatur hätte keinen Einfluss auf die Maßstäbe, so müsste man dem Raum eine andere, kompliziertere Geometrie zuschreiben. Beide Beschreibungssysteme können die selbe Gegebenheit darstellen, wobei das eine komplizierter mit zusätzlichen Annahmen ist. Diesen Unterschied stufte Poincaré als willkürlich ein und er kam zu dem Schluss, dass man stets das einfachste Modell, in diesem Fall die Euklidische Geometrie, als Wahrheit anzusehen hat. Mie übertrug Poincarés Beispiel in die ART, dabei spielten die willkürlichen oder fingierten Gravitationsfelder nun die Rolle der Nicht-Eulidizität in Poincarés Beispiel. Diese komplizierten Modelle lehnte Mie ab, auch wenn, wie er eingestand, sie die Gegebenheiten richtig umschreiben.

Einstein ließ nach diesen Vorwürfen den Artikel „Raum und Zeit...“ von Moritz Schlick<sup>232</sup> durch Arnold Berliner an Mie schicken. Dieser Artikel war an eine breitere Leserschaft mit philosophischen Interessen gerichtet und erklärte aus Einsteins Sicht die heuristischen Grundlagen der ART gut. In der Zeitschrift *Die Naturwissenschaften*, die von Berliner herausgegeben wurde, druckte man jedoch nicht den letzten Abschnitt über „Beziehungen zur Philosophie“ ab, dieser war nur in der Broschüre enthalten, die Berliner nun an Mie schickte. Dieser Umstand war Mie bewusst und so antwortete er in einem Anflug von Ironie:

„Wenn Sie meinen Standpunkt kennenlernen wollen, so bitte ich Sie, nur in der Broschüre von Herrn Dr. Schlick, für deren Übersendung ich auch Ihnen herzlich danke, den letzten Abschnitt: ‘VIII, Beziehungen zur Philosophie’ einmal durchlesen zu wollen. [...] Er trifft so durchaus meine Ansichten, dass ich fast verwundert bin, dass ihn ein anderer geschrieben hat. Besonders stimme ich in der Kritik Machs, die trotz der sehr verbindlichen Form in der Sache doch ziemlich scharf ist, durchaus mit dem Verfasser überein.“<sup>233</sup>

Schlicks Abschnitt über die Beziehungen zur Philosophie enthält zum Schluss eine Gegenüberstellung von Machs Positivismus und einer „mehr realistischen“ Einstellung<sup>234</sup>. Nach Mach können nur Dinge als real aufgefasst werden, die wirklich beobachtbar sind, andere Vorstellungen (wie zum Beispiel ein Molekül oder

---

<sup>231</sup> Siehe [Poincaré 1902, S. 83-87].

<sup>232</sup> Als Artikel unter [Schlick 1917a] erschienen und als Broschüre unter [Schlick 1917b].

<sup>233</sup> Mie an Einstein, 17. Februar 1918 [Collected Papers 8, Doc. 465].

<sup>234</sup> [Schlick 1917b, S. 58-63]

ein elektrisches Feld) sind nur Hilfskonstruktionen. In diesem Sinne kann man Einsteins Forderung nach den beobachtbaren Massen als einzigen Einfluss auf den metrischen Tensor auffassen. Die nach Schlick realistischere Auffassung empfindet diese Einengung des Wirklichkeitsbegriffes als ungerechtfertigt, er kann Machs Unterscheidung nicht nachvollziehen: „Der Bleistift in meiner Hand soll real sein, die Moleküle aber, die ihn aufbauen, bloße Fiktionen.“<sup>235</sup> Nach Schlicks Interpretation von Mach gehören sogar die Koinzidenzen, die Einstein als das einzig Beobachtbare ansieht, in die Kategorie der Hilfskonstruktionen.

Mie zitierte in der Folge direkt aus Schlicks Broschüre<sup>236</sup> eine Passage, in der Schlick darlegte, dass mehrere Theorien in der Lage sein können, Vorhersagen über den weiteren Verlauf gewisser Gegebenheiten zu treffen. Diese Theorien beschreiben die gleiche objektive Realität. Dabei gibt es nach Schlick unter diesen Theorien eine, die die einfachste ist, und deswegen zu bevorzugen ist. Allerdings beruht dies

„nicht bloß auf einer praktischen Ökonomie, einer Art geistiger Bequemlichkeit [...] sondern es hat einen logischen Grund darin, daß die einfachste Theorie ein Minimum von *willkürlichen* Momenten enthält.“<sup>237</sup>

Hier bezog sich Schlick auf die willkürlichen Momente, die einer Theorie zu Grunde liegen. Das sind zum Beispiel Annahmen über das Verhalten der Maßstäbe bei Temperaturschwankungen (ob es Längenänderungen gibt oder nicht). Somit beziehen sich Mies Vorwürfe, Einstein widerspräche der Logik, nicht auf mathematische Schlüsse, sondern auf Logik im Sinne von methodologischen Argumenten.<sup>238</sup> Mie wendete nun die Schlicksche Unterscheidung auf die verschiedenen Koordinatensysteme innerhalb der ART an: Die beiden Koordinatensysteme im Beispiel mit den beiden Kugeln könne man nach Mie nur dann als gleichwertig betrachten,

„wenn man eine Welt, die mit einem willkürlich fingierten, nicht von Materie verursachten Gravitationsfeld gesetzmäßig erfüllt ist, für ebenso annehmbar ansieht.“<sup>239</sup>

Diese Gedanken schlugen sich direkt nieder in Mies populärer Darstellung der ART, dort schrieb er recht früh, im Abschnitt „Die Orientierung im Raum“:

---

<sup>235</sup> [Schlick 1917b, S. 60]

<sup>236</sup> Und zwar zitiert Mie in [Collected Papers 8, Doc. 465] direkt aus [Schlick 1917b, S. 62].

<sup>237</sup> [Schlick 1917b, S. 62]

<sup>238</sup> Siehe dazu [Illy 1992, S. 248].

<sup>239</sup> [Collected Papers 8, Doc. 456]

„jeder Physiker ist von der Überzeugung durchdrungen, daß es tatsächlich eine Art der Beschreibung gebe, welche nicht nur die einfachst mögliche ist, sondern welche auch zu einer die menschliche Vernunft befriedigenden Entwirrung der [...] verworren scheinenden natürlichen Vorgänge führt. Diese Überzeugung [...] ist ein metaphysisches Prinzip der Naturforschung, ein Prinzip welches sich nicht mathematisch formulieren läßt, welches aber doch von größter Wichtigkeit ist. Dieses Prinzip hat schon Kant [...] als einziges metaphysische Prinzip der Naturwissenschaft anerkannt.“<sup>240</sup>

Einstein antwortete auf Mies Kritik, dass er mit dem Zitat aus Schlicks Broschüre einverstanden ist, allerdings nicht mit Mies Anwendung.<sup>241</sup> Auch wenn in verschiedenen Koordinatensystemen die Beschreibung einfacher ist, so hat dies keine prinzipielle Bedeutung. Einstein widersprach Mies Behauptung,

„man müsse den  $g_{\mu\nu}$  im einen Falle bestimmte Eigenschaften beilegen, welche durch die Materie nicht bedingt seien, dass dies dagegen bei ‘natürlicher Koordinatenwahl’ nicht der Fall sei. *Wenn Sie damit Recht hätten, so würde ich meinen Standpunkt, ja überhaupt meine ganze Theorie, für haltlos ansehen.* Aber sehen wir zu, wie es damit steht.“<sup>242</sup>

Anschließend verglich Einstein zwei Koordinatensysteme, von denen das eine im Unendlichen durch die bekannte Minkowskische Metrik charakterisiert ist, das andere jedoch merkwürdige Werte annimmt. Hier wollte Einstein einen Widerspruch in Mies Denkweise aufdecken: Denn sagt man zum einen, die Minkowskische Metrik ist einfacher, deshalb bevorzugt, so zieht man nicht-kovariante Randbedingungen vor. Dies ist aber in einer sonst kovarianten Theorie nicht haltbar, damit wäre die kovariante Theorie überflüssig. Zu den metaphysischen Vorwürfen gab Einstein keine konkreten Gegenargumente.

Um den Unterschied zwischen Mie und Einstein knapp zusammenzufassen seien nochmals zwei Argumente gegenübergestellt: Einstein sagte, seine Theorie erfülle die Bedingung, dass das Gravitationsfeld vollkommen durch beobachtbare Massen bestimmt sei, da Mie diesen Punkt (das ebene Universum) ablehnte, denkt Mie nicht relativistisch. Mie dagegen sagte, dass in Einsteins Theorie in verschiedenen Systemen Gravitationsfelder vorkommen, die nicht von beobachtbaren Massen ausgehen. Diese Systeme seien physikalisch unbefriedigender und damit unberechtigt.

---

<sup>240</sup> [Mie 1921, S. 6]

<sup>241</sup> [Collected Papers 8, Doc. 470]

<sup>242</sup> [Collected Papers 8, Doc. 470]

Man erkennt hier zum einen den Unterschied in der Auffassung von Feldern. Für Mie kommen offensichtlich nur klassische Gravitationsfelder in Frage, während Einstein solche Felder akzeptiert, die von den Quellen in gewisser Masse unabhängig existieren<sup>243</sup>. Die Problematik mit dieser Auffassung Einsteins löst sich, wenn man bedenkt, dass er Gravitations- und Trägheitsfelder als untrennbar ansieht, was zu dem nächsten Diskussionspunkt führt:

#### 4.3.4 Es gibt keine physikalische Relativität der Rotation

Neben dem eben angesprochenen Beispiel der rotierenden Kugeln versuchte Mie<sup>244</sup> am Beispiel der Erde zu argumentieren, dass zumindest Rotationen doch nachweisbar wären. So lassen der Foucaultsche Pendelversuch, die Passatwinde und andere Erscheinungen auf die rotierende Erde schließen. Mie gab zwar zu, dass mittels der allgemeinen Kovarianz ein mit der Erde rotierendes System die physikalischen Gegebenheiten richtig wiedergibt, aber diesem nun einmal die „willkürlich fingierten“ Eigenschaften des metrischen Tensors zugeschrieben werden müssen. Dies lehnte Mie im Schlickschen Sinne ab.

Neben den bisher angebrachten Einwänden gegen das physikalische Denken hatte Mie noch ein weiteres Argument, mit dem er Einstein davon überzeugen wollte, dass die Allgemeine Relativität im Einsteinschen Sinne nicht erfüllt ist: In der speziellen Relativitätstheorie konnte man mit einfachen Methoden die Dynamik eines gleichförmig bewegten Elektrons und seiner Felder aus einem ruhenden Elektron errechnen. In sofern sah Mie das spezielle Relativitätsprinzip als ein echtes Relativitätsprinzip an. Aber bisher konnte man noch keine solche Lösung für rotierende Elektronen angeben und Mie glaubte, dass dies prinzipiell nicht möglich sei:

„Ich glaube, es wäre für die Wissenschaft von grosser Wichtigkeit, dieses Integral [diese Lösung der Feldgleichungen] zu gewinnen, aber man kann es eben nicht. Da sieht man doch ganz deutlich, dass das Prinzip der allgemeinen Transformierbarkeit nicht etwa ein Prinzip der allgemeinen Relativität ist.“<sup>245</sup>

Hierauf antwortete Einstein zum einen mit dem oben angegebenen Zitat zur Anwendung der Schlickschen Ansichten<sup>246</sup> und bestritt nicht, dass verschiedene Koordinatensysteme zu einfacheren Beschreibungen führen, dem folgten allerdings die schon betrachteten Argumente zur Einführung des  $\lambda$ -Terms und keine weiteren

---

<sup>243</sup> [Norton 1985, S. 15]

<sup>244</sup> Im Brief mit den Zitaten von Schlick, [Collected Papers 8, Doc. 465].

<sup>245</sup> [Collected Papers 8, Doc. 465]

<sup>246</sup> „Wenn Sie damit recht hätten...“

zur Gleichberechtigung der Bezugssysteme. Zum rotierenden Elektron bemerkte er, dass eine Lösung dieses Problems „manche formale Vereinfachung bedeuten dürfte“, die allerdings gegenüber der SRT vergleichbar gering ausfallen würde. Dies beruhe auf dem Auftreten nichtstationärer Gravitationsfelder.<sup>247</sup>

Nachdem Mie im folgenden Brief vor allem Ideen über die Wahl von Koordinatensystemen schrieb, stellte Einstein im letzten Brief vor dem Treffen klar, dass man nach der Relativitätstheorie kein Recht hat, die „Erde als *wirklich* rotierend zu betrachten. Denn das Schwere- und Trägheitsfeld wird als unzerlegbare Einheit aufgefasst.“<sup>248</sup> Dabei wird der Foucaultsche Pendelversuch durch das gesamte Trägheits- und Schwerfeld bestimmt. Leider wird hier der Briefwechsel durch das Treffen unterbrochen und damit gibt es vorerst keine Informationen mehr zu diesem Thema.

Mie sollte auf das Problem des rotierenden Elektrons in Bad Nauheim nochmals zurückkommen, befand dort aber ebenfalls, dass es sich hier nicht um ein Prinzip der allgemeinen Relativität handeln kann. Dieses Mal hatte er aber als Beweismaterial die entsprechenden Berechnungen gemeistert: In dem letzten verfügbaren Brief von Mie an Einstein vom Juni 1919 deutete er diese Ergebnisse an. Mie schien das in der Quantenphysik aufgetretene Problem von einem um ein Atomkern kreisenden, aber nicht strahlenden Elektron mit Hilfe der ART erklären zu wollen. Dazu ging Mie von einem ruhenden Elektron aus, dass er auf die Bahn um das Gravitationszentrum transformierte. Diese Berechnungen führten im strahlungsfreien Fall zu einem merkwürdigen Ergebnis: Das rotierende Elektron befand sich in einem elektromagnetischen Feld, das stehenden Wellen entsprach, die sich im Innern von einer (das Feld) reflektierenden Hohlkugel ausbildeten, aber das Elektron strahlte nicht<sup>249</sup>. Er konnte mit Hilfe der ART nicht das strahlungsfreie rotierende Elektron herleiten, ohne die merkwürdige Hilfskonstruktion der stehenden Wellen.

Ein weiterer Ansatz sollte ein im sonst freien Raum<sup>250</sup> um ein Gravitationszentrum kreisendes Elektron berechnen. Dieses Problem auf Ruhe transformiert, brachte jedoch ein Elektron, dass in einem elektromagnetischen Drehfeld ruhte, wobei sich dieses Feld entgegen der Drehung des Elektrons bewegte. Für Mie war dies ein weiteres Indiz gegen die Gleichberechtigung aller Bezugssysteme:

„Man sieht also, dass man mit dem allgemeinen Relativitätsprinzip vorsichtig sein muss. Die im völlig freien Raum rotierende geladene Kugel ergibt sich nicht aus der ruhenden Kugel durch ‚Transformation‘. [...] Die Bewegung ist daher in diesem Fall auch ‚absolut‘

---

<sup>247</sup> Aus Einstein an Mie, 22. Februar 1918, [Collected Papers 8, Doc. 470].

<sup>248</sup> [Collected Papers 8, Doc. 493]

<sup>249</sup> [Mie 1920b, S. 658]

<sup>250</sup> Also ohne stehende Wellen und reflektierende Hohlkugel, [Mie 1920b, S. 58/59].



nachzuweisen, nämlich an der Strahlung und dem mit der Strahlung verbundenen Energieverlust.“<sup>251</sup>

Mie war also weiterhin überzeugt zumindest die Rotation absolut nachweisen zu können. Um dies deutlich zu machen, stellte er zu Beginn seines Vortrages in Bad Nauheim das Relativitätsprinzip als Relativität der Gravitationswirkungen<sup>252</sup> dar.

#### 4.3.5 Mie erkennt sein Materiekonzept

Ein anderer Punkt interessierte Mie besonders: Es ging dabei um die Interpretation der Feldgleichungen mit kosmologischem Glied und einer Folgerung die Einstein aus ihnen zog. Einstein leitete die Beziehungen

$$\varrho = \frac{2}{\kappa \cdot R^2} \text{ und } \kappa \cdot \varrho = 2\lambda$$

ab, wobei  $\varrho$  eine Dichte,  $R$  der Riemannsche Krümmungsskalar und  $\kappa$  eine weitere Konstante ist. Mie zweifelte im ersten Februar-Brief an der Gültigkeit dieser Gleichungen, da er mit verschiedenen Maßeinheiten zu verschiedenen Relationen kam: Das Gewicht 1 Gramm wird definiert durch das Gewicht von einer bestimmten Zahl von Atomen einer bestimmten Sorte.<sup>253</sup> Diese Definition ist unabhängig von der Definition von Längen- und Zeitmaßen, so dass man in den Beziehungen zwischen  $\varrho$ ,  $R$  und  $\lambda$  noch einen konstanten Faktor frei bestimmen kann, der ebenso auf die Metrik Einfluss hat. In der Tat kann man Einsteins Lösung der Feldgleichungen in den „Kosmologischen Betrachtungen“ noch mit einem konstanten Faktor multiplizieren und erhält eine weitere Lösung<sup>254</sup>.

Daraufhin stellte Einstein klar,<sup>255</sup> dass man  $\varrho$  als relative Dichte im Vergleich zur Dichte  $\varrho_{H_2O} = 1$  von Wasser bestimmt und Längen anhand von Wellenzügen einer genau definierten Lichtquelle, einer speziellen Spektrallinie von Cadmium, definiert. Diese Definitionen sind unabhängig von der Wahl der Koordinatensysteme und damit „natürlich gemessen“. Mie akzeptierte diese Klarstellung.

Es blieb für Mie aber die Frage nach der universellen Gültigkeit der Feldgleichungen und seinen Folgerungen. Einsteins kosmologische Überlegungen erforderten Mittlungen der Materiedichte über große Gebiete. Mie sah in diesen Gleichungen scheinbar eine Parallele zu seinem Materie-Konzept:

---

<sup>251</sup> Mie an Einstein, 29. Juni 1919, aus: ALS. [17 226].

<sup>252</sup> [Mie 1920b, S. 652]

<sup>253</sup> Zum Beispiel definiert man:  $1gr := N/16 O^2 - \text{Atome}$ , wobei  $N$  die Avogadro-Zahl ist, statt  $N$  wären auch andere Zahlen denkbar.

<sup>254</sup> Dazu siehe Fußnote 8 in: [Collected Papers 8, Doc. 456].

<sup>255</sup> [Collected Papers 8, Doc. 460]

„Gelten sie [die Feldgleichungen] aber in jedem Raumelement, so muss man doch wohl das von Ihnen gefundene Integral [die oben genannten Gleichungen] so deuten, dass der ganze Raum überall da, wo keine eigentliche Anhäufungen von Materie sind, gleichmäßig von einem *kontinuierlichen*, äußerst feinen materiellen Hauch von der Dichte  $\rho$  durchzogen sein muss. [...] Die Sache ist also einfach die, dass im ebenen Raum die Atmosphäre von höchst verdünnter Energie, welche die materiellen Teilchen umgibt, sehr schnell gegen  $\rho = 0$  konvergiert, dass sie dagegen in dem gekrümmten Raum sehr schnell gegen  $\rho = 2\lambda/\kappa$  konvergiert.“<sup>256</sup>

Etwas später kritisierte Mie, dass Einstein nicht gezeigt hat, ob es wirklich eine Lösung der Feldgleichungen mit  $\lambda$ -Term geben kann, die mit einer Dichte  $\rho = 0$  in den leeren Teilen des Universums vereinbar ist. Sofern diese Lösung nicht existiert, muss mit Mie seine obige Auffassung von der „verdünnten Energie“ richtig sein. Genau genommen stellte diese Behauptung ein Argument gegen die von Mie bevorzugte Welt dar.

Einstein widersprach dieser Auffassung und deutete im folgenden Brief an, dass seine Näherung zwar zu falschen Lösungen in der Nähe der Materie führt, jedoch „über den geometrischen Charakter der Welt *im Grossen* richtig orientiert werde“.<sup>257</sup> Mie betonte darauf seinen Glauben an die Existenz einer Lösung, die in seinem Sinne eine „kontinuierliche Massendichte“ im Raum erlaube, worauf Einstein sein Vorgehen im Näherungsverfahren der Materiedichte präzisierete.

Wie diese Ausführungen zeigen, hat Mie hier sein eigenes Ätherkonzept wiedererkannt. Er sah die Parallele zwischen dem im gesamten Universum existierenden „Hauch“ von Materiedichte zu seinen eigenen Vorstellungen, das gesamte Universum sei erfüllt von Feld geringer Intensität und nur dort, wo echte Materie sitzt, steigen die Feld- bzw. Dichtenwerte an.

Diese Andeutungen Mies erinnern stark an eine Kritik, die De Sitter zuvor schon geäußert hat: Dieser erkannte im Frühjahr 1917 die Notwendigkeit der Einführung von „übernatürlichen Massen“ als Erklärung der Trägheit in Einsteins kosmologischen Welt-Modell<sup>258</sup>. Für De Sitter übernahm diese Welt-Materie in Einsteins neuem Modell die Rolle der entfernten Massen in der Theorie ohne  $\lambda$  und hatte wesentlichen Anteil an der Erzeugung der Trägheit. De Sitter verglich diese „Welt-Materie“ mit dem absoluten Raum in Newtons Mechanik.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass Mie in den Notizen zu seinem Brief vom 17. Februar 1918 mit einer Metrik  $g_{\mu\nu}$  als Lösung der Feldgleichungen mit  $\lambda$  ar-

<sup>256</sup> [Collected Papers 8, Doc. 465]

<sup>257</sup> [Collected Papers 8, Doc. 470]

<sup>258</sup> Siehe zum Beispiel De Sitter an Einstein, 20. März 1917, [Collected Papers 8, Doc. 313].

beitete. Hier erkannte Mie offensichtlich, dass in Einsteins Modell Abweichungen von der Gleichförmigkeit der Materiedichte  $\rho$  zu nichtstatischen Lösungen führen müssen<sup>259</sup>. Mies Formulierung der Metrik enthielt noch einen unbestimmten Parameter, der je nach Wahl zu den Lösungen von De Sitter oder Einstein führte. Diese Ergebnisse wurden von Mie jedoch weder im Briefverkehr erwähnt noch veröffentlicht, so dass man davon ausgehen kann, dass ihm die Tragweite dieser Erkenntnis nicht bewusst war:

Denn diese Diskussionen zwischen De Sitter und Einstein, bzw. Mie und Einstein gingen zum Teil an den wirklichen Konsequenzen vorbei. Zum Beispiel wurde mehr als ein Jahrzehnt später gezeigt, dass Einsteins Modell nicht statisch ist, was auf die Spur der expandierenden Weltmodelle führte. An Mies Metrik hätte dies vielleicht schneller erkannt werden können.

Die hier gemachten Andeutungen sind ein Indiz dafür, dass in den ersten Jahren selbst die wichtigsten, an den Grundlagen der ART beteiligten Physiker, dieses Neuland nicht vollkommen durchschauten.

#### 4.3.6 Wahl von Koordinatensystemen

**Mies Koordinatisierung in den Wolfskehlvorlesungen:** In den Wolfskehlvorlesungen stellte Mie ein Verfahren zur Bestimmung von Koordinatensystemen vor<sup>260</sup>, die nach Mie bevorzugte Systeme sind. Dabei stellte er einleitend sein uns mittlerweile bekanntes Problem dar, dass innerhalb der ART verschiedene Bezugssysteme erlaubt sind, aber zu den merkwürdigen Erscheinungen des sich schlängelnden Stabes führen. Bevor Einstein diese Vorlesungen überhaupt zu Gesicht bekam stellte er seine Meinung Mie gegenüber klar: „Auch ich glaube, dass eine Spezialisierung des Koordinatensystems *a posteriori* vielleicht die Theorie sehr verschönern könnte. Aber kein bisher in dieser Absicht unternommene Versuch kann ernstlich befriedigen.“<sup>261</sup>

Einstein und Mie stimmten überein, dass Koordinatensysteme lediglich Nummerierungen der Raum-Zeit-Punkte sind<sup>262</sup>, bei deren Wahl wir weitestgehend freigestellt sind, und die Anpassung an physikalische Gegebenheiten ein geeignetes Kriterium zur Koordinatenwahl abgibt. Die Problematik kam für Mie mit der Längen- und Zeitbestimmung ins Spiel. Dabei kann man zum einen die mit gewöhnlichen Instrumenten ermittelten Maße übernehmen oder zum anderen an den gemessenen Werten durch Einbeziehung der Gravitation Normierungen auf

---

<sup>259</sup> Siehe Fußnote 7 zu Doc. 355 und Fußnoten 15 und 18 zu Doc. 465 in [Collected Papers 8] für diese und weiterführende Hinweise.

<sup>260</sup> Siehe [Mie 1917, S. 598 ff].

<sup>261</sup> [Collected Papers 8, Doc. 348]

<sup>262</sup> Zum Beispiel [Collected Papers 8, Doc. 460] und [Mie 1917, S. 599].

ein von Gravitation freies Gebiet vornehmen. Demnach ordnete Mie in Göttingen Einstein dem zweiten Standpunkt zu, da Einstein in seinen Arbeiten von verlangsamten Uhren, veränderten Maßstäben und variabler Lichtgeschwindigkeit in von Null verschiedenen Gravitationspotentialen schrieb<sup>263</sup>. Dies ist für Mie der physikalische Standpunkt. Allerdings ist so noch kein eindeutiges System festgelegt, da die Reskalierung der Maßstäbe nur über den Vergleich von Messresultaten vorgenommen werden kann und eine gewisse Willkür übrigbleibt.

Nach der von Mie sogenannten Hilbertschen Auffassung der Welt ist die „Welt ein geometrisches Gebilde von vier Dimensionen, welches in weiten Gebieten (wo ein ideales Vakuum ist) mit einer vierdimensionalen Ebene zusammenfällt“<sup>264</sup>. Die Koordinatisierung in dieser Welt erfolgt durch Aufsuchen von geodätischen Linien in der Raum-Zeit, die in gleiche Abschnitte unterteilt werden. Dort, wo dieses Netz von geodätischen Linien der Minkowskischen Geometrie genügt, ist nun das Vakuum, an den großen Abweichungen von der Minkowskischen Geometrie die Materie. Hier wird Materie über die Abweichungen von der Euklidizität definiert.

Mie fasste diese Hilbertsche Welt als eingebettet in einen höherdimensionalen Raum von fünf oder mehr Dimensionen auf. In diesem Raum existiert eine vierdimensionale Ebene, die zumindest in den von Materie freien Gebieten mit der Hilbertschen Welt zusammenfällt. Nun kann man in dieser Ebene ein kartesisches Koordinatensystem konstruieren und die Hilbertsche Welt senkrecht auf diese Ebene projizieren. Das Bild der Projektion ist eindeutig definiert und da auf dieser Ebene das kartesische Koordinatensystem angegeben wurde, gilt in diesem Bild überall die Minkowskische Geometrie. Mie nannte diese Projektion „die Welt“ und verglich kurz beide Systeme (die Hilbertsche Welt und deren Projektion) und kam so zu dem Schluss, dass die Projektion dem genügt, was der Physiker als physikalische Welt ansehen kann.

In der Hilbertschen Welt beschreibt folglich die Metrik  $g_{\mu\nu}$  die entsprechende nachmeßbare Geometrie, während die physikalische Welt den Metrik-Tensor als Gravitationsfeld in einer Minkowski Raum-Zeit (oder nach Einstein in einer konstant gekrümmten Raum-Zeit) auffasst. In der physikalischen Welt werden die Maße mittels der Metrik auf Vakuum-Größen zurückgerechnet<sup>265</sup>.

**Diskussion über die Koordinatenwahl** Einstein kommentierte diese Betrachtungen, natürlich mit der Ablehnung der euklidischen Grundgestalt, als sehr vernünftig und fasste knapp zusammen:

---

<sup>263</sup> Zum Beispiel in [Einstein 1916a, S. 818].

<sup>264</sup> [Mie 1917, S. 601]

<sup>265</sup> Siehe Fußnote 15 zu [Collected Papers 8, Doc. 456].

„Bestände sie [die euklidische Grundgestalt], so wäre Ihr Vorschlag der Koordinatenwahl durch Orthogonalprojektion auf den  $R_4$  in dem 10-dimensionalen euklidischen Raum sehr vernünftig. [...] Mit den Betrachtungen über die Notwendigkeit der Existenz bevorzugter Koordinatensysteme stimme ich nicht überein. Sie können leicht Verwirrung stiften.“<sup>266</sup>

Etwa einen Monat zuvor wurde Einstein durch Rudolf Förster auf den von Mie angedeuteten Satz aufmerksam gemacht, nach dem eine  $n$ -dimensionale Riemannsche Mannigfaltigkeit in einen  $n(n+1)/2$ -dimensionalen Euklidischen Raum eingebettet werden kann.<sup>267</sup> Mit Hilfe dieses Satzes kam Einstein zur Dimension 10 für den übergeordneten Raum. In einer Veröffentlichung von 1920 sollte Mie diesen Satz explizit angeben<sup>268</sup>. Mie zweifelte aber zwischenzeitlich, wie er am 5. Februar schilderte, ob seine Koordinatisierung auf dem eben beschriebenen Wege zu erhalten sei. Er ahnte, dass es verschiedene Projektionen der Hilbertschen Welt geben kann, die zu verschiedenen Koordinatisierungen führen würden. Es stellte sich also die Frage, wie denn nun diejenige Projektion zu finden sei, die mit der physikalischen Welt übereinstimmt, oder welche der Projektionen die einfachste sei.<sup>269</sup>

Mie verstand eine Bemerkung Einsteins in den Kosmologischen Betrachtungen in seinem eigenen Sinne: Einstein nahm dort<sup>270</sup> eine homogene Massendichte im Universum als Näherung an, statt eine inhomogenen Verteilung (wie sie die Sterne und Planeten tatsächlich bilden) und verglich diese Näherung mit der Annahme der Geometer, die Erde sei ein Ellipsoid. Einstein ging es dabei um die Feststellung, dass die Erde, ähnlich wie das Universum nicht durchgängig glatt ist, sondern lokale Unebenheiten vorweist. Mie drehte diesen Vergleich in seine Richtung, in dem er argumentierte, die Geometer benötigten dieses Ellipsoid als Anhaltspunkt, ohne den keine sinnvollen Aussagen zu machen sind.

Thematisch lehnte sich die Diskussion um die Koordinatisierung der Welt eng an die Diskussion um bevorzugte Systeme an. Besonders Einstein betonte oft, eine Bevorzugung habe keinen tieferen Sinn als die Vereinfachung: „Die Koordinatenwahl nach dem Gesichtspunkt der Übersichtlichkeit kann grosse praktische

<sup>266</sup> Einstein an Mie, 22. Dezember 1917, [Collected Papers 8, Doc. 416].

<sup>267</sup> Der Satz ist in Pascals Repertorio (1898-1900) zu finden und geht zurück auf Schläfli,

Förster schrieb: zu einem „gegebenen Linienelement  $ds^2 = \sum_1^4 g_{ik} dx_i dx_k$  kann man stets

ein System von höchstens 10 Funktionen  $y_i(x_1, x_2, x_3, x_4)$  finden, so daß  $ds^2 = \sum_1^{10} dy_i^2$ “ gilt.

Siehe Doc. 398 und dortige Fußnote 2 in [Collected Papers 8].

<sup>268</sup> Siehe Fußnote 2 zu [Collected Papers 8, Doc. 416] und [Mie 1920a, S. 61-62].

<sup>269</sup> [Collected Papers 8, Doc. 456]

<sup>270</sup> [Collected Papers 6, Doc. 43, S. 148]

Bedeutung haben; prinzipiell ist sie bedeutungslos<sup>271</sup>. In diesem Brief verabschiedete sich Einstein, in dem er elegant das Thema an Mie übergab: „Ich glaube, dass wir unsere Standpunkte gegenseitig verstehen lernen werden auf diesem Wege der ‚successiven Approximation‘“<sup>272</sup>. Dieser „sukzessiven Approximation“ entsprach dann Mies nächster Versuch, Einstein von einem absoluten Bezugssystem zu überzeugen. Dabei lag Mies nächster Vorstellung die Idee zugrunde, dass erhöhte Messgenauigkeit mehr Klarheit über das Gravitationsfeld liefert, beziehungsweise ein umfangreicheres Wissen über die Bewegungen der Gestirne zu einem genaueren, dem absoluten Koordinatensystem angepassteren führt: Eine grobe (oder vielleicht ungenaue) Messung auf der Erde wird ausreichend gut erklärt, wenn man die Erde als ruhend, ohne zusätzliche Kräfte auffasst. Genauere Versuche, wie zum Beispiel das Foucaultsche Pendel verlangen jedoch ein anderes, rotierendes System, dass man selbst dann noch feststellen kann, wenn über die Bewegung der Erde relativ zur Sonne nichts bekannt ist. Genauere Messungen werden schließlich die Präzession der Erdachse nachweisen und so weiter und so fort. Mie glaubte, „nur auf dem Wege der Approximation sukzessive“ zu einem „absolutem Koordinatensystem“ zu gelangen<sup>273</sup>. Allerdings räumte er ein, dass dieses absolute System nie gefunden werden wird und eine gewisse Ungenauigkeit stets erhalten bleiben wird, da man wohl nie das gesamte Universum erfassen kann.

In diesem Sinne meinte Mie, „das Prinzip von der Relativität des Gravitationsfeldes ist also an die Bedingung geknüpft, dass man eine gewisse Grenze für die Genauigkeit der Beobachtungen voraussetzt“<sup>274</sup>. Je nach Art des Gravitationsfeldes, ob homogen, inhomogen oder stark inhomogen, sah Mie die Möglichkeit, durch geeignete Reskalierungen der Grundeinheiten, das entsprechende System als ein System ohne Gravitationsfeld aufzufassen, wie in Kapitel (2.6.3) dargestellt wurde. Dabei bleibt es dem messenden Physiker sogar überlassen, inhomogene Gravitationsfelder als homogene aufzufassen, sofern dies innerhalb der Genauigkeit des Experiments bleibt.

Mie suchte offensichtlich nach einem Bezug zur Praxis der experimentellen Physiker. Dies versuchte er durch seine Unterscheidung der verschiedenen Fälle von Approximation, beziehungsweise von Komplexität sowohl des Gravitationsfeldes als auch des Bezugssystems auszudrücken. In diesem Sinne zeigt sich die Parallele zu dem in der Theorie der Materie ausgedrückten Wunsch Mies, die gesamte Welt in einer Hamiltonfunktion zu erfassen, mit dem Streben nach einem absoluten Koordinatensystem.

---

<sup>271</sup> Einstein an Mie, 8. Februar 1918, [Collected Papers 8, Doc. 460].

<sup>272</sup> *ibid.*

<sup>273</sup> Mie an Einstein, 21. März 1918, [Collected Papers 8, Doc 488].

<sup>274</sup> Mie an Einstein, 21. März 1918 in: [Collected Papers 8, Doc. 488].

### 4.3.7 Einstein: einmal Mathematiker - einmal Physiker?

Nachdem Mie Einstein in seiner Berliner Wohnung traf, war er zumindest zeitweilig von Einsteins Ansichten überzeugt worden. Jedoch deutete Mie im Brief vom Mai 1918 an<sup>275</sup>, dass nach und nach wieder die alten Zweifel in ihm aufkamen. Er äußerte auch den Verdacht, der schriftliche Meinungs austausch sei überwiegend ein reiner Wortstreit gewesen, der nur mündlich auflösbar sei. Mie hatte den Eindruck, dass Einstein zwischen zwei verschiedenen Standpunkten, dem des Physikers und dem des Mathematikers schwankte, je nach dem ob er über die Bedeutung und Funktion einer Theorie nachdachte oder ein konkretes gegebenes physikalisches Problem lösen wollte. Zu diesem Schluss kam Mie, nachdem er sich zwischenzeitlich mit den Schwarzschild Arbeiten<sup>276</sup> zur Gravitation und mit Einsteins Artikel über die „Näherungsweise Integration der Feldgleichungen“<sup>277</sup> befasst hatte.

Zum einen musste Schwarzschild verschiedene Bedingungen an den metrischen Tensor bezüglich Symmetrien und Verhalten der  $g_{\mu\nu}$  im Unendlichen stellen, um zu einer konkreten Lösung der Feldgleichungen für ein Punktteilchen, beziehungsweise für eine homogene Kugel zu gelangen.<sup>278</sup> Zum anderen leitete Einstein in seinem Artikel sechs verschiedene Typen von Gravitationswellen ab, von denen fünf keine Energie transportieren. Die Welleneigenschaft dieser ungewöhnlichen Wellen war im Wesentlichen durch der Wahl der Koordinaten bedingt. Für einen Physiker machen Wellen ohne Energietransport kaum Sinn und so stellte Einstein dort die Bedingung  $\sqrt{-g} = 1$  auf, mit der er die ersten fünf Wellentypen ausschloss. Einstein bemerkte, „daß der Koordinatenwahl gemäß der Bedingung  $\sqrt{-g} = 1$  eine tiefe physikalische Berechtigung zukommt“<sup>279</sup> Mie fühlte sich hier natürlich an sein Demonstrationsbeispiel mit dem sich schlängelnden Stab erinnert, mit dem er entsprechende Koordinatensysteme als unvernünftig ausschließen wollte, gerade dagegen hat Einstein desöfteren protestiert und nun fand Mie durch Einstein seine persönliche Sicht mit dem Zusatz der „tiefen physikalischen Berechtigung“ bestätigt und bemerkte:

---

<sup>275</sup> Mie an Einstein, 6. Mai 1918 [Collected Papers 8, Doc. 532].

<sup>276</sup> Diese stellen die erste Lösung der Feldgleichungen von 1915 für konkrete Probleme dar (Massenpunkt und homogene Kugel) und sind durch Einstein veröffentlicht worden, siehe [Schwarzschild 1916].

<sup>277</sup> [Einstein 1916b]

<sup>278</sup> Mie vermutete, dass Schwarzschild die Unstetigkeitsstelle des Feldes mit Respekt vor dem Newtonpotential  $m/r$  in den Ursprung legte. Er sah keinen Grund diese Wahl beizubehalten. Die eigenen Rechnungen mit seinem „natürlichen Koordinatensystem“ in den Wolfkehlvorlesungen erwiesen sich als Schwarzschild-Lösungen für die Dichte  $\rho = 0$ , die Wahl des „natürlichen Systems“ führt automatisch zu der Bedingung  $\sqrt{-g} = 1$ , weshalb Mie seine Betrachtungen bestätigt sieht, siehe: [Illy 1992, S. 252].

<sup>279</sup> [Einstein 1916b, S. 696]

„Wir denken eben beide wesentlich physikalisch. Die mathematische Denkweise kann ganz anders geartet sein [...]. Wenn man die Probleme nur mathematisch bewältigen will, so darf man die paradoxesten Annahmen machen [...].“<sup>280</sup>

Mie deutete nochmals an, dass ein System, in dem die Erde ruht mathematisch einwandfrei zu beschreiben ist, aber ein Physiker die entsprechenden Konsequenzen ablehnen muss. Wenn Einstein sagt, die Erde ruhe, dann steht er auf dem Standpunkt des Mathematikers, in dem anderen Fall nimmt er den physikalischen ein. Die mathematische Denkweise kann nach Mie sehr nützlich sein, aber ohne physikalische Prinzipien komme man nicht sehr weit: „Diese Prinzipien leiten den Physiker, sei es bewußt oder unbewußt. Und Sie haben all die wundervollen Konsequenzen aus Ihrer Theorie [...] gerade deswegen entdeckt, weil Sie den mathematischen Standpunkt der ‘Hilbertschen Welt’ nicht konsequent inne gehalten, sondern vielmehr als Physiker gedacht haben.“<sup>281</sup> Da nun die allgemeine Transformierbarkeit einen Nachteil der Theorie bildet und Mie glaubte, dass Einstein ihm in den Betrachtungen zur Auffindung eines „natürlichen Koordinatensystem“ in gewisser Weise zustimme, stellte sich die Frage, wie man aus dem Dilemma herauskommen könne, erst allgemeine Kovarianz zu fordern und sie durch die Herausbildung dieser Koordinatensysteme wieder zu beseitigen: Hier betonte Mie abschließend, dass er noch immer glaube, dies nur Mittels der Relativität des Gravitationsfeldes zu erreichen.

#### 4.4 Was lernten beide aus diesen Diskussionen?

Es ist schwierig, einen gegenseitigen Einfluss auf Einstein oder Mie aus dieser Diskussion abzuleiten. Zumindest sah Mie ein, dass sein Ansatz zur Gravitationstheorie mittels skalarem Potential falsch war und Einstein recht hatte. Vielleicht hatte er an Einstein gelernt, dass man Mittels heuristischer Prinzipien und Axiomen argumentieren kann, wie am Beispiel des kosmologischen Terms zu sehen war. In diesem Sinne wandelte sich seine Formulierung des Prinzips von der Relativität des Gravitationspotentials zu der des Gravitationsfeldes und schließlich zur Relativität der Gravitationswirkungen.

Illy legte dar, dass sich Mie in verschiedenen Details wandelte: er erwähnt Mies Verwendung der Wörter von „absolut“ (1913/14), über „natürlich“ (1917) und „vernunftgemäß“ (1920) zur Beschreibung der entsprechenden Koordinatensystemen, desweiteren akzeptierte Mie nichteuklidische Geometrien und beliebige Bezugssysteme als mathematische Alternativen.<sup>282</sup>

---

<sup>280</sup> [Collected Papers 8, Doc. 532]

<sup>281</sup> [Collected Papers 8, Doc. 532]

<sup>282</sup> Nach [Illy 1992, S. 256].



In Bezug auf Einstein kann ich hier nur Illys Standpunkt wiederholen, dass Mie kaum auf Einstein gewirkt haben wird und er lediglich zusätzliche Anstöße zu den Kritiken von de Sitter gab.<sup>283</sup> Allerdings glaube ich, dass Mies hitzige Polemik in der Zeit Anfang 1914 Einstein als Impuls diente, über die Schwächen der Entwurf-Theorie nachzudenken und so mit dazu beitrug, dass Einstein sich weiter öffentlich für diese Theorie einsetzte.

---

<sup>283</sup> *ibid.*

## 5 Zusammenfassung

Nachdem die Arbeit hinter einem liegt und die Erinnerung an die frühen Kapitel langsam dämmrig wird, sollte hier ein kurzer Gesamtüberblick gegeben werden: Zum einen wurden in dieser Arbeit die wesentlichen Merkmale der Mieschen Theorie der Materie dargestellt. Dabei standen Mies Vorstellung der Materie als Feldsingularitäten und die Herleitung der Feldgleichungen aus der Hamilton- bzw. Weltfunktion im Vordergrund. Bei der geschichtlichen Einordnung wurde angedeutet, wie Mies Theorie im Rahmen des elektromagnetischen Feldkonzeptes eine zentrale Stellung zukommt und Mie als später Verfechter dieses Konzeptes zu sehen ist<sup>284</sup>. In der Folge war diese Theorie für verschiedene Wissenschaftler wie Born, Weyl und Hilbert von Bedeutung: Weyl bezog sich auf Mies Materiekonzept im Sinne des elektromagnetischen Programms, während Born und Hilbert vor allem von der Einführung des Variationsprinzips in die Elektrodynamik Gebrauch machten. Dabei kam Hilbert Mies Interpretation des Kausalitätsprinzips gelegen, sie stimmte praktisch mit seiner eigenen überein. Born war es dabei, der Hilbert schon früh in Mies Theorie einwies und er war in den 1930er Jahren noch immer von Mies Darstellung fasziniert. Er arbeitete die Parallele der Lagrange-schen Mechanik zu Mies Theorie heraus.

Das Scheitern von Mies Theorie aufgrund der Hinzunahme der Potentiale spielte ebenfalls eine Rolle, dies wurde schon früh erkannt und vor allem von den Physikern wie Pauli und Einstein kritisiert. Die Problematik der Potentiale führte Mie zu den verschiedenen Formulierungen des Satzes von der Relativität des Gravitationspotentials. Hierbei konnte man eine unterschiedliche Handhabung der Postulate von Mie und Einstein erkennen: Einstein benutzte seine heuristischen Ideen, um so auf neue Theorien zu stoßen und andere Theorien abzulehnen. Mie benutzte Axiome zum Teil, um neue Wege zu gehen, aber ebenso, wie im Falle des Gravitationspotentials, um im Nachhinein seine Theorie zu korrigieren. So konnte Mie lange glauben, dass sein Postulat auch auf die ART anwendbar sei: Mie glaubte die Relativität des Gravitationspotentials wäre ein Ersatz für Einsteins Allgemeines Relativitätsprinzip.

Da Mie in Einsteins Entwurf-Theorie von 1913 einen Konkurrenten zu seiner Theorie der Materie sah, befasste er sich zunehmendst mit der Entwurf-Theorie und argumentierte in scharfem Ton in der Wien-Diskussion und der darauf folgenden „Hitzigen Polemik“ gegen diese Theorie. Obwohl seine Argumentation in dieser Zeit seltend korrekt war, traf er mit seiner Ablehnung des Allgemeinen Relativitätsprinzips den Punkt: Einstein selbst stellte in dieser Zeit kaum dar, weshalb eigentlich dieses Prinzip noch von Bedeutung sein sollte, wo doch die Entwurf-Theorie noch nicht einmal allgemein kovariant war.

Als Mie, durch die Autorität von Hilbert überzeugt, die Einsteinsche Theorie von 1915 akzeptierte, blieben ihm jedoch die Zweifel an der Bedeutung dieser

---

<sup>284</sup> Für eine detailliertere Studie dieser Geschichte wird auf [Vizgin 1994] verwiesen.

Prinzipien. Er schien eingesehen zu haben, dass diese Prinzipien auf dem Weg zur ART von Bedeutung waren. Der interessante Briefwechsel zwischen Einstein und Mie deckt sehr schön die oben erwähnten verschiedenen Denkweisen auf: Einstein benutzte die Prinzipien als Werkzeuge eines Theoretikers auf der Suche nach der Theorie, während Mie aus der Sicht des dem Alltag nächstehenden Experimentalphysikers die Axiome auf ihre Nützlichkeit und einfache Handhabung hin abklopfte: Nachdem die Theorie einmal aufgestellt war, suchte Mie nach der physikalischen Bedeutung und kam zu den Schlüssen: Spekulationen über das Unendliche interessieren nicht, fingierte Gravitationsfelder sind abzulehnen, die Euklidizität des Universums sollte man bis zum Beweis des Gegenteils für richtig halten und es gibt einfache und deshalb berechnete Bezugssysteme. Trotzdem waren die theoretischen Aspekte wie die allgemeine Kovarianz oder die Einführung des kosmologischen Gliedes für Mie wichtige Ansätze, die wie im Fall des kosmologischen Gliedes sogar zu neuen Erkenntnissen führen könnten. Einstein dagegen war nicht bereit von seinen Leitmotiven abzurücken, wenn es um die grundlegenden Konsequenzen seiner Theorie ging.

Der Briefwechsel beweist vor allem, wie schwer es Einstein hatte, sich in der Fachwelt durchzusetzen. Seine Theorie hat nun einmal den Nachteil, wenig mit dem Alltagsleben eines Physikers seiner Zeit zu tun zu haben und die mathematischen Methoden waren für viele Physiker mehr als ungewohnt. Selbst der interessierte Mie suchte in seinem Satz von der Relativität des Gravitationspotentials eine Alternative zur allgemeinen Kovarianz. An diesem Briefwechsel konnte man als Beispiel erkennen, wie engagiert die Diskussion unter den interessierten Wissenschaftlern verlief.

Ein gegenseitiger Einfluss von Einstein und Mie konnte kaum ausgemacht werden. Die Richtung von Mies Kritik ging in die Richtung von de Sitters Kritik, der allerdings früher als Mie eine intensivere Kommunikation mit Einstein führte, so dass sein Einfluss deutlich größer war.

Noch offene Fragen gibt es nach dieser Arbeit: Eine Untersuchung des Einflusses der Mieschen Theorie besonders auf Weyl und Born, bei letzterem auf den späten Born, scheint von Interesse zu sein. Ebenfalls könnte eine nähere Betrachtung der von Born herausgearbeiteten Struktur der Mieschen Theorie mit Hinblick auf die Vertauschungsrelationen der Quantenphysik lohnend sein.

## Literatur

- [Born 1914] Born, Max: „Der Impuls-Energie-Satz in der Elektrodynamik von Gustav Mie.“ In: *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften (Göttingen) Mathematisch-Physikalische Klasse* (1914), S. 23-36.
- [Born 1922] Born, Max: „Hilbert und die Physik.“ In: *Die Naturwissenschaften* **10** (1922), S. 88-93.
- [Born 1934] Born, Max: „On the Quantum Theory of the Electromagnetic Field.“ In: *Proceedings of the Royal Society A* **143** (1934), S. 410-437.
- [Born 1984] Born, Max: *Die Relativitätstheorie Einsteins*, Nachdruck der 5. Auflage. Berlin, Springer-Verlag, 1984.
- [Born, Infeld 1934] Born, Max und Infeld, Leopold: „Foundations of the New Field Theory.“ In: *Proceedings of the Royal Society A* **144** (1934), S. 425-451.
- [Blum 1994] Blum, Petra: *Die Bedeutung von Variationsprinzipien in der Physik für David Hilbert*. Unveröffentlichte Staatsexamensarbeit an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 1994.
- [Busch 1913] Busch, Hans: „85. Versammlung deutscher Naturforscher und Ärzte in Wien vom 21. bis 28. September 1913“. In: *Physikalische Zeitschrift* **14** (1913), S. 1073-1075.
- [Collected Papers 2] Stachel, John; Cassidy, David C.; Renn, Jürgen; Schulmann, Robert: *The Collected Papers of Albert Einstein Vol 2, The Swiss Years: Writings, 1900-1909*. Princeton, Princeton University Press, 1989.
- [Collected Papers 3] Klein, Martin J., Kox, A. J. et al.: *The Collected Papers of Albert Einstein Vol 3, The Swiss Years: Writings, 1909-1911*. Princeton, Princeton University Press, 1993.
- [Collected Papers 4] Klein, Martin J., Kox, A. J. et al.: *The Collected Papers of Albert Einstein Vol 4, The Swiss Years: Writings, 1912-1914*. Princeton, Princeton University Press, 1995.
- [Collected Papers 5] Klein, Martin J. et al.: *The Collected Papers of Albert Einstein Vol 5, The Swiss Years: Correspondence, 1902-1904*. Princeton, Princeton University Press, 1993.

- [Collected Papers 6] Kox, A.J. et al.: *The Collected Papers of Albert Einstein Vol 6, The Berlin Years: Writings, 1914-1917*. Princeton, Princeton University Press, 1996.
- [Collected Papers 8] Schulmann, Robert et al.: *The Collected Papers of Albert Einstein, Vol 8, Part A+B*. Princeton, Princeton University Press, 1998.
- [Corry 1996] Corry, Leo: *Hilbert and Physics (1900-1915)*. Preprint **43** des Max-Planck-Instituts für Wissenschaftsgeschichte, Berlin, 12. August 1996.
- [Corry 2000] Corry, Leo: „From Mie’s Electromagnetic Theory of Matter to Hilbert’s Unified Foundations of Physics“. In: *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **30(2)** (2000), S. 159-183.
- [Corry, et al 1997] Corry, Leo; Renn, Jürgen; Stachel, John: „Beleated Decision in the Hilbert-Einstein Priority Dispute“. In: *Science* **278** (1997), S. 1270-1273.
- [De Sitter 1917] De Sitter, Willem: „On the Relativity of Inertia. Remarks concerning Einstein’s latest Hypothesis“. *Proceedings of the Royal Academy of Sciences Amsterdam* **19** (1916-17), S. 1217-1225.
- [DSB 1975] Gillispie, Charles C. (Hrsg): *Dictionary of Scientific Biography*. New York, Charles Scriber’s Sons, 1975.
- [Earman et al 1993] Earman, John; Michael Jannsen, John D. Norton (eds): *Einstein Studies Vol 5: New Studies in the History of General Relativity*. Boston, Birkhäuser, 1993.
- [Eberhard 1938] Eberhard, O.: *Zeugnis Deutscher Frömmigkeit*. Leipzig, 1938, S. 224-226.
- [Einstein 1905] Einstein, Albert: „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“. In: *Annalen der Physik* **17** (1905), S. 891-921.
- [Einstein 1907] Einstein, Albert: „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen.“ In: *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* **4**, 1907, S. 411-462.
- [Einstein 1909] Einstein, Albert: „Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems.“ In: *Physikalische Zeitschrift* **10** (1909), S. 185-193.

- [Einstein/Grossmann 1913] Einstein, Albert; Grossmann, Marcel: *Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation*. Leipzig, Teubner, 1913.
- [Einstein 1913] Einstein, Albert: „Zum gegenwärtigen Stande des Gravitationsproblems“. In: *Physikalische Zeitschrift* **14** (1913), 1249-1262.
- [Einstein 1914a] Einstein, Albert: „Prinzipielles zur verallgemeinerten Relativitätstheorie und Gravitationstheorie“. In: *Physikalische Zeitschrift* **15** (1914), 176-180.
- [Einstein 1914b] Einstein, Albert: „Zum Relativitäts-Problem“. In: *Scientia* **15** (1914), S. 337-348.
- [Einstein 1916a] Einstein, Albert: „Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie“. In: *Annalen der Physik* **49** S. 769-822.
- [Einstein 1916b] Einstein, Albert: „Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation“. In: *Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte* (1916): S. 688-696.
- [Einstein 1916c] Einstein, Albert: „Über Friedrich Kottlers Abhandlung ‚Über Einsteins Äquivalenzhypothese und die Gravitation‘“. In: *Annalen der Physik* **51** (1916), S. 639-642.
- [Einstein 1918] Einstein, Albert: „Prinzipielles zur allgemeinen Relativitätstheorie“. In: *Annalen der Physik* **55** (1918), S. 241-244.
- [Einstein 1919] Einstein, Albert: „Spielen Gravitationsfelder im Aufbau der materiellen Elementarteilchen eine wesentliche Rolle?“. In: *[Lorentz et al. 1982]*
- [Einstein/Mie 1913] Einstein, A.; Mie, G. et al.: „Diskussion“. In: *Physikalische Zeitschrift* **14** (1913), 1262-1266.
- [Einstein/Mie 1920] Einstein, A.; Mie, G. et al.: „Allgemeine Diskussion über Relativitätstheorie“. In: *Physikalische Zeitschrift* **21** (1920), S. 651-659.
- [Einstein/Infeld 1995] Einstein, Albert; Infeld, Leopold: *Die Evolution der Physik*, Neuausgabe. Reinbek bei Hamburg, Rowohlt, 1995.
- [Eisenstaedt 1992] Eisenstaedt, Jean; Kox, A.J. (ed.): *Einstein Studies Vol. 3: Studies in the history of General Relativity*. Boston, Birkhäuser, 1992.

- [Emde 1948] Emde, F.: „Gustav Mie 80 Jahre“. In: *Physikalische Blätter* **4** (1948), S. 349, 350.
- [Fölsing 1995] Fölsing, Albrecht: *Albert Einstein Eine Biographie*. Frankfurt am Main, Suhrkamp, 1995.
- [Goenner et al 1999] Goenner, Hubert; Jürgen Renn, Jim Ritter, Tilman Sauer (eds): *Einstein Studies Vol 7: The Expanding Worlds of General Relativity*. Boston, Birkhäuser, 1999.
- [Hentschel 1990] Hentschel, Klaus: *Interpretationen und Fehlinterpretationen der speziellen und der allgemeinen Relativitätstheorie durch Zeitgenossen Albert Einsteins*. Basel, Birkhäuser, 1990.
- [Hermann 1998] Hermann, Armin: *Einstein. Der Weltweise und sein Jahrhundert. Eine Biographie*, 2. Auflage. München, Piper, 1998.
- [Hilbert 1916a] Hilbert, David: „Die Grundlagen der Physik I“. In: *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften (Göttingen) Mathematische-Physikalische Klasse* (1916), S. 395-407.
- [Hilbert 1916b] Hilbert, David: *Die Grundlagen der Physik I*, Vorlesung gehalten im Sommersemester 1916, Lesezimmer Mathematisches Institut der Universität Göttingen, Herr Mathees.
- [Hilbert 1917] Hilbert, David: „Die Grundlagen der Physik II“. In: *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften (Göttingen) Mathematische-Physikalische Klasse* (1917), S. 53-76.
- [Hönl 1953] Hönl, H.: „Gustav Mie 85 Jahre“. In: *Physikalische Blätter* **9** (1953), S. 508-510.
- [Hönl 1968] Hönl, H.: „Intensitätsgrößen und Quantitätsgrößen“. In: *Physikalische Blätter* **24** (1968), S. 498-502.
- [Howard et al. 1989] Howard, Don and John Stachel, (eds): *Einstein Studies Vol 1: Einstein and the History of General Relativity*. Boston, Birkhäuser, 1989.
- [Illy 1992] Illy, József: „The Correspondance of Albert Einstein and Gustav Mie, 1917-1918.“ In: *[Eisenstaedt 1992, S. 244-259]*

- [Jungnickel et al 1986] Jungnickel, Christa; Russel McCormach: *Intellectual Mastery of Nature Volume 2 The Now Mighty Theoretical Physics 1870 - 1925*. Chicago, The University of Chicago Press, 1986.
- [Kast 1957] Kast, W.: „Gustav Mie †“. In: *Physikalische Blätter* **13** (1957), S. 129-131.
- [Kerszberg 1986] Kerszberg, Pierre: „The Einstein-de Sitter Controversy of 1916-17 and the Rise of Relativistic Cosmology“. In: *[Collected Papers 8]*, S. 351-357.
- [Katz 1993] Katz, Victor J.: *A History of Mathematics*. New York, HarperCollins College Publishers, 1993.
- [Koyré 1957] Koyré, Alexandre: *From the Closed World to the Infinite Universe*. Baltimore and London, John Hopkins University Press, 1957.
- [Kretschmann 1917] Kretschmann, Erich: „Über den physikalischen Sinn der Relativitätspostulate, A. Einsteins neue und seine ursprüngliche Relativitätstheorie“. In: *Annalen der Physik* **53** (1917), S. 575-614.
- [Laue 1911] Laue, Max: *Das Relativitätsprinzip*. Braunschweig, Friedrich Vieweg und Sohn, 1911, S. 37-76.
- [Laue 1921] Laue, Max von: *Die Relativitätstheorie. Erster Band: Das Relativitätsprinzip der Lorentztransformationen.*, Braunschweig, Vieweg, 1921.
- [Laue 1923] Laue, Max von: *Die Relativitätstheorie. Zweiter Band: Die allgemeine Relativitätstheorie und Einsteins Lehre von der Schwerkraft*. Braunschweig, Vieweg, 1923.
- [Laue 1947] Laue, Max von: *Geschichte der Physik*, 2. Auflage. Bonn, Universitätsverlag Bonn, 1947.
- [Lorentz et al. 1982] Lorentz, Hendrik Anton; Albert Einstein und Hermann Minkowski: *Das Relativitätsprinzip - Eine Sammlung von Abhandlungen*. Achte Auflage, unveränderter Nachdruck der fünften Auflage von 1923, Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 1982.
- [Mach 1963] Mach, Ernst: *Die Mechanik Historisch kritisch dargestellt*, Nachdruck der 9. Auflage, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt 1963.



- [McCormmach 1970] McCormmach, Russel: „H. A. Lorentz and the Electromagnetic View of Nature“. In: *Isis* **61** (1970), S. 457-497.
- [Mehra 1974] Mehra, Jagdish: *Einstein, Hilbert, and the Theory of Gravitation*. Dordrecht und Boston, D. Reidel Publishing Company, 1974.
- [Mie 1907] Mie, Gustav: *Moleküle, Atome, Weltäther*. Zweite Auflage, Leipzig, B.G. Teubner, 1907.
- [Mie 1910] Mie, Gustav: *Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus*. Stuttgart, Enke, 1910.
- [Mie 1912a] Mie, Gustav: „Grundlagen einer Theorie der Materie. Erste Mitteilung“. In: *Annalen der Physik* **37** (1912), S. 511-534.
- [Mie 1912b] Mie, Gustav: „Grundlagen einer Theorie der Materie. Zweite Mitteilung“. In: *Annalen der Physik* **39** (1912), S. 1-40.
- [Mie 1913] Mie, Gustav: „Grundlagen einer Theorie der Materie. Dritte Mitteilung, Schluß“. In: *Annalen der Physik* **40** (1913), S. 1-66.
- [Mie 1914a] Mie, Gustav: „Bemerkungen zu der Einsteinschen Gravitationstheorie“. In: *Physikalische Zeitschrift* **15** (1914), S. 115-122.
- [Mie 1914b] Mie, Gustav: „Bemerkungen zu der Einsteinschen Gravitationstheorie II“. In: *Physikalische Zeitschrift* **15** (1914), S. 169-176.
- [Mie 1915] Mie, Gustav: „Das Prinzip von der Relativität des Gravitationspotentials“. In: *Arbeiten aus dem Gebiet der Physik, Mathematik, Chemie. Festschrift Julius Elster und Hans Geitel*. Braunschweig, Vieweg, 1915, S. 251-268.
- [Mie 1917] Mie, Gustav: „Die Einsteinsche Gravitationstheorie und das Problem der Materie“. In: *Physikalische Zeitschrift* **18** (1917), S. 551-556, 574-580, 596-602.
- [Mie 1920a] Mie, Gustav: „Die Einführung eines vernunftgemäßen Koordinatensystems in die Einsteinsche Gravitationstheorie und das Gravitationsfeld einer schweren Kugel“. In: *Annalen der Physik* **62** (1920), S. 46-74.

- [Mie 1920b] Mie, Gustav: „Das elektrische Feld eines um ein Gravitationszentrum rotierenden geladenen Partikelchens“. In: *Physikalische Zeitschrift* **21** (1921), S. 651-659.
- [Mie 1921] Mie, Gustav: *Die Einsteinsche Gravitationstheorie* Versuch einer allgemein verständlichen Darstellung der Theorie. Leipzig, Verlag S. Hirzel, 1921.
- [Mie 1941] Mie, Gustav: *Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus*, 2. Auflage. Stuttgart, Ferdinand Enke Verlag, 1941.
- [Mie 1948] Mie, Gustav: „Aus meinem Leben“. In: *Zeitwende* **19** (1948), S. 733-743.
- [North 1965] North, John: *The Measure of the Universe*. New York, Dover Publikations, 1990.
- [Norton 1984] Norton, John: „How Einstein Found His Field Equations“. In: [*Howard et al. 1989*], S. 101-159.
- [Norton 1985] Norton, John: „What Was Einstein’s Principle of Equivalence?“. In: [*Howard et al. 1989*], S. 5-47.
- [Pais 1986] Pais, Abraham: *Raffiniert ist der Herrgott...: Albert Einstein; eine wissenschaftliche Biographie*. Braunschweig, Vieweg, 1986.
- [Pauli 1919] Pauli, Wolfgang jr: in: *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften* Band 5, 2. Teil, Hrsg: Sommerfeld, A., Leipzig, Teubner, 1904-1922.
- [Poincaré 1902] Poincaré, Henri: *La science et l’hypothèse*. Paris, Flammarion, 1902.
- [Reich 1994] Reich, Karin: *Die Entwicklung des Tensorkalküls*. Basel, Birkhäuser, 1994.
- [Renn, Sauer 1999] Renn, Jürgen; Tilman Sauer: „Heuristics and Mathematical Representation in Einstein’s Search for a Gravitational Field Equation“. In: [*Goenner et al 1999*], S. 87-125.
- [Renn, Stachel 1999] Renn, Jürgen; John Stachel: „Hilbert’s Foundation of Physics: From a Theory of Everything to a Constituent of General Relativity“. In: *Preprint des Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte*, Preprint 118, Berlin, 1999.

- [Röhle 2000] Röhle, Stefan: *Mathematische Probleme in der Einstein - de Sitter Kontroverse*. Unveröffentlichte Staatsexamensarbeit an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 2000.
- [Rosenberger 2000] Rosenberger, Lars T.: *Das Problem der Rotation in der Allgemeinen Relativitätstheorie*. Unveröffentlichte Staatsexamensarbeit an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 2000.
- [Rowe 1998] Rowe, David E.: „The Göttingen Response to General Relativity and Emmy Noether’s Theorems“. In: Gray, J. J. (ed).: *The Visual World: Geometry and Physics (1900-1930)*, Oxford, Oxford University Press, 1998.
- [Rowe 2000] Rowe, David E.: „Einstein meets Hilbert: At the Crossroads of Physics and Mathematics“. In: *Preprint-Reihe des Fachbereichs Mathematik* der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Nr. 8, 28.03.2000.
- [Rynasiewicz 1989] Rynasiewicz, Robert: „Kretschmann’s Analysis of Covariance and Relativity Principles“. In: *[Howard et al. 1989, S. 431-462]*.
- [Schlick 1917a] Schlick, Moritz: „Raum und Zeit in der gegenwärtigen Physik“. In: *Die Naturwissenschaften* **5** (1917), S. 161-167, 177-186.
- [Schlick 1917b] Schlick, Moritz: *Raum und Zeit in der gegenwärtigen Physik*. Berlin, Julius Springer, 1917.
- [Schwarzschild 1916] Schwarzschild, Karl: „Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie“ und „Über das Gravitationsfeld einer Kugel aus inkompressibler Flüssigkeit nach der Einsteinschen Theorie“. *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte* (1916), S. 189-196 und S. 424-434.
- [Segrè 1980] Segrè, Emilio: *From X-Rays to Quarks - Modern Physicists and Their Discoveries*. New York, W. H. Freeman and Company, 1980.
- [Simonyi 1990] Simonyi, Károly: *Kulturgeschichte der Physik*. Leipzig, Jena, Berlin, Urania-Verlag, 1990.

- [Sommerfeld 1910a] Sommerfeld, Arnold: „Zur Relativitätstheorie I: Vierdimensionale Vektoralgebra“. In: *Annalen der Physik* **32** (1910), S. 749-776.
- [Sommerfeld 1910b] Sommerfeld, Arnold: „Zur Relativitätstheorie II: Vierdimensionale Vektoranalysis“. In: *Annalen der Physik* **33** (1910), S. 649-689.
- [Stachel 1980] Stachel, John: „Einstein’s Search for General Covariance.“ In: [Howard et al. 1989, S. 63-100].
- [Swenson 1979] Swenson, Loyd S. Jr.: *Genesis of Relativity*. Houston, Burt Franklin & CO. Inc., 1979.
- [Treder 1975] Treder, Hans-Jürgen: „Zur Geschichte der Physik an der Berliner Akademie von 1870 bis 1930“. In: Heinrich Scheel (Hrsg.): *Physiker über Physiker. Wahlvorschläge zur Aufnahme von Physikern in die Berliner Akademie 1870 bis 1929*, Berlin, Akademie Verlag, 1975.
- [Unbekannt 1949] Unbekannt: „Zum 80. Geburtstag von Professor Mie“. In: *Naturwissenschaftliche Rundschau* **2** (1949), S. 42-43.
- [Vizgin 1989] Vizgin, Vladimir P.: „Einstein, Hilbert, and Weyl: The Genesis of the Geometrical Unified Field Theory Program“. In: [Howard et al. 1989, S. 300-314].
- [Vizgin 1994] Vizgin, Vladimir P.: *Unified Field Theories in the first third of the 20th century*. Basel, Boston, Berlin, Birkhäuser Verlag, 1994.
- [Walter 1999] Walter, Scott: „Minkowski, Mathematicians, and the Mathematical Theory of Relativity“. In: [Goenner et al 1999] S. 45-86.
- [Weyl 1918] Weyl, Hermann: *Raum-Zeit-Materie*, 1. Auflage. Berlin, Springer, 1918.
- [Weyl 1919] Weyl, Hermann: „Eine neue Erweiterung der Relativitätstheorie“. In: *Annalen der Physik* **59** (1919), S. 101-133.
- [Weyl 1921] Weyl, Hermann: „Feld und Materie“. In: *Annalen der Physik* **65** (1921), S. 541-563.
- [Weyl 1924] Weyl, Hermann: „Was ist Materie?“. In: *Die Naturwissenschaften* **12** (1924), S. 561-568, 585-593 und 604-611.

- [Weyl 1993] Weyl, Hermann: *Raum-Zeit-Materie*, 8. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1993.
- [Wußing 1971] Wußing, Hans (Hrsg): *Die Hilbertschen Probleme*. Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig K.G., 1971.

# Personenverzeichnis

- Abraham, Max (1875-1922): 5, 6, 33, 50, 65-68, 71, 79
- Berliner, Arnold (1862-1942): 91
- Besso, Michele (1873-1955): 52, 61
- Biot, Jean Baptiste (1774-1862): 22
- Boltzmann, Ludwig (1844-1906): 1
- Born, Max (1882-1970): 2, 10, 19, 27, 34-38, 40, 44, 46, 47, 61, 66, 105, 106
- Brillouin, J an (1889-1969): 79
- Cayley, Arthur (1821-1895): 11
- Christoffel, Elwin (1829-1900): 15
- Corry, Leo: 35, 38
- Coulomb, Charles Auguste de (1736-1806): 22
- Davidson, Charles (1875-?): 52
- Debye, Peter (1884-1966): 19
- De Sitter, Willem (1872-1943): 52, 55, 64, 83, 85, 97, 98, 104, 106
- Dyson, Sir Frank (1868-1939): 52
- Eddington, Arthur (1882-1944): 52, 59
- Ehrenfest, Paul (1880-1933): 61
- Einstein, Albert (1879-1955)
- Eötvös, Lor nd (Roland) (1813-1871): 69, 72
- Euklid (um 365-300 v. Chr.): 17, 41, 82, 83, 85, 86, 91, 100, 105
- Faraday, Michael (1791-1867): 22
- Fekete, Michael (1886-1957): 72
- Förster, Rudolf (1885-1941): 100
- Foucault, Jean (1819-1868): 94, 95, 101
- Freundlich, Erwin (1885-1964): 42, 63, 80
- Gauß, Carl Friedrich (1777-1855): 50
- Gehrcke, Ernst (1878-1960): 60
- Gerber, Paul: 60
- Goethe, Johann Wolfgang von (1749-1832): 1
- Grebe, Ludwig: 65
- Grossmann, Marcel (1878-1936): 15, 39, 50, 51, 63, 68, 71, 73
- Habicht, Konrad (1876-1958): 49
- Haeckel, Ernst (1834-1919): 17
- Hamilton, Sir William Rowan (1805-1865): 24-30, 36, 40, 41, 52, 68, 70, 77, 81, 86, 105
- Hasenöhrl, Friedrich (1874-1917): 66
- Hertz, Heinrich (1857-1894): 4, 18, 66
- Hilbert, David (1862-1943): 2, 7, 10, 27, 34-45, 47, 63, 64, 80, 81, 99, 100, 103, 105
- Illy, Jozsef: 81, 103, 104
- Infeld, Leopold (1898-1968): 19
- Kaluza, Theodor (1885-1954): 4
- Kant, Immanuel (1724-1804): 17, 93
- Kaufmann, Walter (1871-1947): 5, 6
- Kepler, Johannes (1571-1630): 67
- Klein, Felix (1849-1925): 64
- Kottler, Friedrich (1886-1965): 60, 87
- König, Walter (1859-?): 18
- Königsberger, Leopold (1837-1921): 17, 18
- Kopernikus, Nikolaus (1473-1543): 84
- Kretschmann, Erich (1887-1973): 52, 55
- Lagrange, Joseph Louis (1736-1813): 27, 36, 47
- Laplace, Pierre Simon (1749-1827): 50
- Larmor, Joseph (1857-1942): 5
- Laue, Max (von) (1879-1960): 11-15, 19, 22, 44, 45, 59, 65, 90
- Lecher, Ernst (1856-1925): 66
- Lehmann, Otto (1855-1922): 18
- Legendre, Adrian Marie (1752-1833): 38
- Lenard, Phillip (1862-1947): 64, 65
- Levi-Civita, Tullio (1873-1941): 15, 51
- Lorentz, Hedrik Antoon (1853-1928): 3-8, 10, 12, 13, 25, 26, 30, 35, 36, 40, 42, 43, 49, 67
- Mach, Ernst (1838-1916): 52, 53, 55, 74, 87, 88, 91, 92
- Maxwell, James (1831-1879): 4-8, 18-20, 23, 36, 54, 66
- McCormach, Russel: 8
- Mie, Gustav (1868-1957)
- Minkowski, Hermann (1864-1909): 3, 6, 11, 15, 50, 58, 82, 93, 99
- Newton, Isaac (1643-1727): 5, 49, 50, 54, 57, 58, 66, 67
- Nordst m, Gunnar (1881-1923): 33, 42, 55, 63, 65, 66, 68, 71, 75
- Norton, John D.: 58
- Pascal, Blaise (1623-1662): 100
- Pauli, Wolfgang (1900-1958): 27, 34, 43, 44, 105
- Pek r: 72
- Planck, Max (1858-1947): 6, 11, 68
- Poincaré, Jules Henri (1854-1912): 11, 23, 89, 91
- Poisson, Sim on Denis (1781-1840): 68
- Ptolemäus, Claudius (um 100- nach 160): 84
- Ricci-Curbastro, Gregorio (1853-1925) : 15, 51
- Riemann, Bernhard (1826-1866): 100
- Rosenbusch, Harry (1836-1914): 17
- Savart, Felix (1791-1841): 22
- Schläfli, Ludwig (1814-1895): 100
- Schleiermacher, : 17
- Schlick, Moritz (1882-1936): 91-94
- Schwarzschild, Karl (1873-1916): 102
- Solvey, Ernest (1838-1922): 6
- Sommerfeld, Arnold (1868-1951): 3, 11, 14, 15, 19, 42, 61
- Stark, Johannes (1874-1957): 49, 56
- Staudinger, Hermann (1881-1965): 19
- Tait, Peter (1831-1901): 10
- Thomson, Joseph John (1856-1940): 5, 6,
- Thomson, Sir William (1824-1907): 10
- Vizgin, Vladimir (1936): 3, 8, 27
- Weber, Wilhelm (1804-1891): 5
- Weyl, Hermann (1885-1955): 2, 4, 10, 27, 34, 43-46, 64, 65, 105, 106
- Weyland, Paul: 60, 64
- Wiechert, Emil (1861-1928): 5
- Wien, Wilhelm (1864-1929): 5, 6, 19, 81
- Zangger, Heinrich (1874-1957): 80