

MATHEMATISCHE STRUKTUREN DER PHYSIKALISCHEN WIRKLICHKEIT¹

Mit der Formulierung meines Themas hoffe ich, von Anfang an meine Stellung zur Frage der Mathematisierbarkeit in einem realistischen Sinn klarzulegen.

Die Thesis, die ich herausarbeiten möchte, ist die folgende: Die Erfolge der mathematischen Physik sind nur zu verstehen, weil damit ein wesentlicher Grundzug der Wirklichkeit begriffen wird, nämlich ihr strukturell-rationaler Aufbau. Die mathematisch formulierbaren Naturgesetze sind eine Entdeckung - und keine Erfindung - des Geistes.

Um diese Thesis zu beweisen oder wenigstens zu begründen, möchte ich kurz auf drei wegweisende Meilensteine in der Wissenschaftsgeschichte der Verbindung zwischen Mathematik und Physik hinweisen. Die Beispiele sollen den Ursprung der mathematischen Physik im 14. Jahrhundert, ihren "klassisch" genannten Aufbau vom 17. bis zum 19. Jahrhundert, und schließlich die Leistung der neuen Physik im 20. Jahrhundert herausstellen.

Dank den bahnbrechenden Forschungsarbeiten der Wissenschaftshistoriker in unserem Jahrhundert - Pierre DUNEM, Constantin MICHALSKY, Anneliese MAIER, Lynn THORNDIKE, George SARTON, Aldo MIELI, Alexandre KOYRÉ, Eduard Jan DIJKSTERHUIS und andere - wissen wir, dass die Quellen der mathematisch orientierten Naturwissenschaft etwa seit dem 9. Jahrhundert (al-HUWARIZMI, später ALGORITMI genannt, der Begründer der Algebra und Arithmetik, starb um 850) entstanden sind aus der fruchtbaren Berührung zwischen der europäischen, griechisch-lateinischen Kultur und der asiatischen, vor allem indischen Wissenschaft (so zum Beispiel das Positions-System in der Ziffernschrift).

Spanien, Süditalien und Sizilien waren die Zentren der Begegnung und Vermittlung, wo arabische, hebräische und christliche Gelehrte zusammenarbeiteten. So entstanden allmählich bis zum 14. Jahrhundert die Schulen der "Terministen" an der Sorbonne in Paris und der "Calculatores" im Merton College in Oxford, deren Arbeiten die Entfaltung der neuzeitlichen, mathematischen Naturwissenschaft bis Leonardo DA VINCI und GALILEI entscheidend beeinflusst haben.

Als *erstes Beispiel* sei die (von DUHEM so genannte) Regel von ORESME erwähnt. NICOLE (er lebte 1323-1382) war Bischof von Lisieux und ein hervorragender Vertreter der Pariser Terministen; nach seinem Geburtsort wurde er meist ORESME genannt. Er hat nahezu 300 Jahre vor der analytischen Geometrie von Rene DESCARTES die Methode der graphischen Darstellung eingeführt und auf ein kinematisches Grundproblem angewandt. In die moderne Welt übertragen, sagt die Regel von ORESME aus: Ein Automobil, das in zehn

¹ Akten des 16. Weltkongresses für Philosophie, Düsseldorf 1978. Sektions-Vorträge Seite 638–643.

Sekunden vom Stillstand auf eine Geschwindigkeit von 100 km/h gleichmäßig beschleunigt, legt denselben Weg zurück wie ein Fahrzeug, das in der gleichen Zeitspanne mit einer gleichbleibenden Geschwindigkeit von 50 Stundenkilometern fährt. Natürlich ist von dieser Erkenntnis, dass bei konstanter Beschleunigung der zurückgelegte Weg gleich ist dem Produkt aus dem Mittelwert der Geschwindigkeit und der Zeitdauer der Fahrt, noch ein weiterer Weg bis zu der Erkenntnis, dass ganz allgemein, auch für beliebig veränderliche Geschwindigkeiten der zurückgelegte Weg gleich ist dem bestimmten Integral der Geschwindigkeit als Funktion der Zeit - eine Erkenntnis, die erst im 17. Jahrhundert möglich wurde dank den voneinander unabhängigen Arbeiten von LEIBNIZ und NEWTON zur Begründung der Infinitesimalrechnung - ; aber der Grund ist gelegt, nämlich die Erkenntnis der Bedeutung der *mathematischen Methode* für eine tiefere Einsicht in den *objektiven* Charakter von Naturvorgängen.

Das *zweite Beispiel*, das einen Höhepunkt der klassischen Physik darstellt, ist dem 1687 erschienenen Hauptwerk von Isaac NEWTON entnommen, das den vielsagenden Titel trägt: *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Es handelt sich um die Ableitung des allgemeinen, weltweiten Gravitationsgesetzes aus dem dritten Planetenbahngesetz, das Johannes KEPLER 1619 in seinem Werk *Harmonices Mundi* eingefügt hatte. Für alle Planetenbahnen gilt ein konstantes Verhältnis zwischen dem Quadrat der Umlaufzeiten t und der dritten Potenz der halben großen Achsen der Bahnellipsen, angenähert Kreisradien r . Es gilt also: $r^3 : t^2 = C$ oder $1 : t^2 = C : r^3$.

Nach der Newtonschen Mechanik ist die Zentrifugalkraft kompensiert durch die Zentripetalkraft $F = 4\pi^2 m \cdot r / t^2$ die im Falle der Planetenbewegung von der Sonne ausgeht; und wenn wir das dritte Keplersche Gesetz in der Form $1/t^2 = C/r^3$ in diesen Ausdruck einsetzen, erhalten wir:

$$F = 4\pi^2 m \cdot r \cdot C / r^3 = 4\pi^2 C \cdot m / r^2$$

Die in Wechselwirkung stehenden Massen sind die Sonnenmasse M und die Planetenmasse (z.B. die Erdmasse) m , sodass endgültig die Beziehung gilt:

$$F = g \cdot M \cdot m / r^2$$

Das heißt: die Anziehungskraft F zwischen zwei Körpern ist gleich dem Produkt der Massen die in Wechselwirkung stehen, multipliziert mit der Konstanten g , jedoch umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung der beiden Körper.

Zweifellos ist diese Entdeckung NEWTONs eine mathematische Struktur, die als universales Naturgesetz im ganzen Kosmos realisiert ist; denn dieses Gesetz bestimmt nicht nur die Bahnen der Planeten um die Sonne, sondern auch alle Bewegungen der Sterne und Sternsysteme, den Lauf des Mondes um die Erde und den Wechsel von Ebbe und Flut, aber auch das Fallen eines Apfels vom Baum. (Nach einer netten Anekdote soll dies letztere Ereignis der Anlass gewesen sein, dass Isaac NEWTON über weltweite mathematische Beziehungen nachdachte.)

NEWTON erkannte wohl die einfache und klare mathematische Struktur des allgemeinen Gravitationsgesetzes - wenigsten in erster Näherung, wenn wir von der generellen Relativitäts- und Gravitationstheorie absehen, die Albert EINSTEIN 1915 veröffentlicht hat. Was aber noch ganz im Dunkeln bleibt, das ist das Warum, die Ursache und das Wesen der Schwerkraft. Am Ende der *Principia*, im *Scholium Generale*, spricht NEWTON den berühmten Satz aus: "Hypotheses non fingo" - "Hypothesen ersinne ich nicht". Er dachte noch an eine "*actio in distans*", eine unmittelbare und momentane Fernwirkung, aber auch an ein vermittelndes stoffliches oder unstoffliches Agens. Die Physik des 19. und 20. Jahrhunderts ist den zuletzt angedeuteten Weg gegangen mit der fortschreitenden Realerfüllung des physikalischen Feldbegriffes. - Es ist bemerkenswert, dass das *elektrische Feld* die gleiche allgemeine mathematische Struktur besitzt wie das *Gravitationsfeld*, abgesehen vom Fehlen einer Proportionalitätskonstanten. Die Anziehungskraft F zwischen zwei geladenen Körpern ist proportional dem Produkt ihrer elektrischen Ladungen und vermindert sich im Verhältnis des Quadrates ihres Abstandes:

$$F = e_1 \cdot e_2 / r^2$$

Die mathematische Struktur dieser Naturgesetze ist durchaus *kontingent*, das heißt: nicht *a priori* aus Formen des menschlichen Denkens ableitbar, sondern in unsagbar mühsamen und geduldigen Beobachtungs- und Messungs-Serien der Wirklichkeit selbst abgeläuscht.

Man denke etwa an die 20 Jahre sorgfältiger astronomischer Messungen, die der Däne Tycho BRAHE bis 1597 in seiner Sternwarte Uraniborg durchführte und die KEPLER für seine drei Planetengesetze brauchte.

Man darf zum Beispiel nicht daran denken, dass die Abnahme der Anziehungskraft gemäss dem Quadrat der Entfernungen der Massen oder der Ladungen aus der Formel für die Berechnung einer Kugeloberfläche ($=4 \cdot r^2 \pi$) analytisch folgen würde. Viel wahrscheinlicher wäre eine raschere Verringerung der Kraft. Die Kernkräfte, die den Zusammenhalt der Atome und damit der Welt überhaupt leisten, haben nur eine Reichweite von 10^{-13} cm (das ist der billionste Teil eines Millimeters).

Nach einem kurzen Überblick über die mathematische Struktur, welche die Wirkung der gravitatorischen und der elektrostatischen Felder beherrscht, ist wenigstens die Erwähnung der inneren Harmonie und Symmetrie der *elektromagnetischen Felder* angebracht, die James Clerk MAXWELL 1864 in einem System von vier partiellen Differentialgleichungen erster Ordnung dargestellt hat. Auch ohne Kenntnis der höheren Mathematik ist durch **epe** Anschauung die Harmonie der Formen - mit kleinen Asymmetrien - erkennbar:

$$\begin{array}{l} \rightarrow \qquad \qquad \qquad \rightarrow \quad \rightarrow \\ \text{div } \vec{E} = 4\pi\rho; \qquad \quad \text{c.rot } \vec{E} = \delta\vec{H} / \delta t \\ \rightarrow \qquad \qquad \qquad \rightarrow \quad \rightarrow \\ \text{div } \vec{H} = 0; \qquad \quad \text{c.rot } \vec{H} = \delta\vec{E} / \delta t \end{array}$$

$\rightarrow \quad \rightarrow$

Die Vektoren \vec{E} und \vec{H} kennzeichnen die elektrische und die magnetische Feldstärke; Q ist die Raumladungsdichte. Die Operatoren div (Divergenz) und rot (Rotation) bedeuten Ordnungssysteme von ersten partiellen Ableitungen nach den drei räumlichen Koordinaten; der Operator $\delta/\delta t$ symbolisiert dieselbe Ableitung (den partiellen Differentialquotienten) nach der zeitlichen Koordinate. MAXWELL konnte zeigen, dass aus seinen Gleichungen die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen (die 1864 noch nicht bekannt waren) gefolgert werden kann, und er erkannte ihre Analogie mit den Lichtwellen.

Der experimentelle Nachweis dieser Wellen gelang Heinrich HERTZ erst 1887, acht Jahre nach dem Tode von MAXWELL. Die Konstante c wurde mit der Lichtgeschwindigkeit identifiziert. Der "prophetische Charakter" der mathematischen Theorie, das heißt, dass sie exakte Voraussagen zukünftiger Entdeckungen ermöglicht, ist zweifellos ein überzeugender Beweis für die Realgültigkeit der Theorie. Die MAXWELLSchen Gleichungen garantieren, dass unsere Welt eine sichtbare, wahrnehmbare Welt ist; dass es möglich ist, Raketen zum Mond und zu den Planeten unseres Sonnensystems und noch weiter zu dirigieren; dass Radiosignale - also elektromagnetische Wellen- aus dem ganzen Weltraum zu uns dringen und erlauben, die Strukturen des Universums zu erforschen. *Die Ursache von realen Wirkungen ist sicher selbst real.*

Wir kommen nun zu der *dritten Gruppe* der eingangs angekündigten Beispiele, nämlich im Hinblick auf die Leistungen der *neuen Physik im 20. Jahrhundert*. Ein wesentliches Novum, ein neuer Grundzug im Vergleich mit der klassischen Physik des 17. bis 19. Jahrhunderts besteht darin, dass die Grundgleichung der Atom- und Kernphysik nicht aus experimentellen und astronomischen Beobachtungsdaten entwickelt wurde, sondern aus einem rein mathematischen, apriorischen Ansatz heraus; und die experimentellen Bestätigungen kamen nachher, "post festum" - was die Realgültigkeit der Mathematik noch mehr, "a fortiori" beweist.

Den Ausgang bildet der mathematische Ausdruck für die Ausbreitung einer harmonischen, sinus-förmigen Wellenschwingung in Abhängigkeit von den Ortskoordinaten x, y, z und von der Zeitkoordinate t . Die periodische Änderung einer Größe ψ wird ortsabhängig beschrieben durch die Gleichung:

$\psi = A \cdot \sin 2\pi \cdot 1/\lambda \cdot x$; zeitabhängig gilt die Gleichung: $\psi = A \cdot \sin 2\pi \nu \cdot t$ (wobei A die Amplitude oder Schwingungsweite ist, λ , die Wellenlänge, also der reziproke Wert $1/\lambda$ die Anzahl der Schwingungen in einem Zentimeter, die sogenannte Wellenzahl; ν ist die Zahl der Schwingungen in einer Sekunde, die sogenannte Frequenz; x ist in cm, t in sec gemessen). Da der zweite Differentialquotient der Funktion $\sin x = -\sin x$ ist, und da die Konstanten jeweils vor die abgeleitete Funktion zu setzen sind, erhält man die zweiten Ableitungen:

$$\partial^2 \psi / \partial x^2 = -4\pi^2 \cdot 1/\lambda^2 \cdot \psi \quad \text{und} \quad \partial^1 \psi / \partial t^2 = -4\pi^2 \cdot v^2 \cdot \psi$$

Setzt man den gemeinsamen Faktor $-4\pi^2 \cdot \psi$ heraus, so erhält man die Gleichsetzung: $\partial^2 \psi / \partial x^2 \cdot \lambda^2 = \partial^2 \psi / \partial t^2 \cdot 1/v^2$; und daraus in dreidimensionaler Erweiterung auf die räumlichen Koordinaten x, y, z (wobei zur Abkürzung der Schreibweise der LAPLACE-Operator Δ benützt wird:

$$\Delta \psi - [(1/\lambda^2 v^2) \cdot (\partial^2 \psi / \partial t^2)] = 0$$

und nach Durchdringung der zweiten Ableitung nach der Zeit t ,

$$\Delta \psi + (4\pi^2 v^2 / \lambda^2 v^2) \psi = 0$$

Bis hierher waren es rein mathematische Betrachtungen, welche die Ausbreitung einer Kugelwelle mit der Geschwindigkeit $v = \lambda \cdot \nu$ beschreiben. *Die physikalische Anwendung* brachte Erwin SCHRODINGER (1887-1961) dadurch hinein, dass er die Entdeckung des Wirkungsquantums h (Max PLANCK 1900) und die Beziehung, die Louis de BROGLIE 1924 vorausgesagt hatte: $\lambda \cdot m v = h$, in die mathematische Wellengleichung einbaute.

Der Faktor $4\pi^2/\lambda^2$ verwandelt sich somit in den Ausdruck $4\pi^2 m^2 v^2/h^2$ und wenn - wie in der physikalischen Formeln üblich - $h/2\pi$ geschrieben wird: h quer, haben wir: $m^2 \cdot v^2 / h$ quer², abgekürzt κ^2

Die SCHRÖDINGER-Gleichung lässt sich somit in der einfachen Form schreiben: $(\Delta + \kappa^2)\psi = 0$.

Als SCHRÖDINGER 1926 seine Arbeit über "Quantisierung als Eigenwertproblem" in den Annalen der Physik veröffentlichte, gab es noch keinen experimentellen Nachweis für die Wellenphänomene der Materieteilchen. Dieser gelang erst ein Jahr später (1927) den amerikanischen Physikern DAVISSON und GERMER durch die Beugung von Elektronenstrahlen in Kristallgittern.

Die SCHRÖDINGER-Gleichung - eine homogene partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung - ermöglicht es, alle auf Wechselwirkungen in den Elektronenhüllen der Atome beruhenden Vorgänge, die Absorption und Emission von Strahlungs-Energie, chemische Bindungen anorganischer und organischer Natur und viele Erscheinungen der Molekular- und Festkörper-Physik zu berechnen und zu erklären.

Ein ausschlaggebender Beweis für die Realgeltung der mathematischen Formen, die Naturgesetze darstellen, ist die Voraussage zukünftiger Entdeckungen. Der Ausdruck $\kappa = m \cdot c/h$ hat die Dimension einer reziproken Länge: $\kappa = 1/\lambda$; und wenn man für m die Protonenmasse einsetzt sowie die bekannten Werte der Konstante von PLANCK, des Wirkungsquantums h und der Lichtgeschwindigkeit c , erhält man für die Länge λ den Wert $1,32 \cdot 10^{-13}$ cm (etwa der billionste Teil eines Millimeters).

Diese Tatsache hat der japanische Physiker Hideki YUKAWA mit der Existenz eines Teilchens verbunden, dessen Masse m sich ergibt, wenn man die bekannten Werte für die Lichtgeschwindigkeit c und das PLANCKsche Wirkungsquantum h , sowie für die Ludolphine A (das Verhältnis zwischen dem Durchmesser und dem Umfang eines Kreises)- in die Gleichung einsetzt. Das Ergebnis ist - unter Berücksichtigung der sehr geringen Reichweite der Kernkräfte von nur dem billionsten Teil eines Millimeters- ein Teilchen von etwa 270 Elektronenmassen, das tatsächlich 1947 -12 Jahre nach der theoretisch-mathematischen Voraussage von YUKAWA-gefunden und Pi-Meson oder Pion genannt wurde, und das für das Kernfeld dieselbe Rolle spielt wie die Lichtquanten oder Photonen für das elektromagnetische Feld. In der heutigen Mikrophysik bedeutet die "kleinste Länge" 1_0 von der Größenordnung 10^{-13} cm nicht nur die Reichweite der Kernkräfte und damit den Atomkernradius, sondern auch den Aktionsradius der Elementarteilchen sowie die minimale Wellenlänge elektromagnetischer Strahlung -der sogenannten harten Gamma-Strahlung.

Eine weitere später durch experimentelle Entdeckung erfüllte Voraussage waren die Quanten der Atomkernfelder, die p-mesonen.

Um das Verhalten von Elementarteilchen nicht nur im Atomverband (Elektronenhüllen- und Kernphysik), sondern auch im freien Zustand bei Beschleunigungen bis 99 % und mehr (immer weniger als 100 %) der Lichtgeschwindigkeit vorausberechnen zu können, war der Übergang zu einem relativistisch invarianten Gleichungs-System notwendig. Zunächst die Einbeziehung der Zeitkoordinate in vierdimensionaler Ordnung (der EINSTEIN-MINKOWSKIWelt) in die Summe der zweiten Differentialquotienten, symbolisch abgekürzt im Übergang vom LAPLACE-Operator Δ zum D'ALEMBERT-OPERATOR OP : $(\Delta + \kappa^2)\psi \rightarrow (OP + \kappa^2)\psi$ (Übergang von der SCHRÖDINGER- zur KLEIN-ORDON-Gleichung.)

Schwierigkeiten bei der physikalischen Interpretation dieser Gleichung führten den englischen mathematischen Physiker Paul Adrien Maurice DIRAC (mit SCHRÖDINGER Nobelpreis 1933) zu der Idee, die Wellenfeldgleichungen zu "linearisieren", das heisst, nur erste Ableitungen nach den Raumzeit-Koordinaten zuzulassen. Die mathematische Möglichkeit dazu bietet die Einführung der DIRACschen γ -Matrizen mit vier Zeilen und vier Spalten, die eine Erweiterung des Verfahrens darstellen, das die einfache Aufgabe der Zerlegung in Linearfaktoren löst:

$a^2 + b^2 = (a+bi).(a - bi)$ mit der Definition: $i^2 = -1$. Die allgemeine Form der DIRAC- Gleichung ist: $\gamma_0(\partial\psi/\partial x) + x\psi=0$. Es ergeben sich Lösungen mit positiver und negativer Energie, mit negativen und positiven elektrischen Ladungen, *womit die Entdeckung der Materie-Antimaterie-Physik, besser gesagt, der Komplementärteilchen-Physik theoretisch-mathematisch voraus gegeben ist, und damit die Frontforschung der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts.*

Die Grundgleichung, die Werner HEISENBERG (Nobelpreis 1932) für seine einheitliche Feldtheorie der Elementarteilchen bis 1967 und darüber hinaus entwickelt hat und die viele experimentelle Tatsachen besser wiedergibt (z.B. Kopplungskonstanten der Elementarteilchen), kann hier nur ohne ausführliche Diskussion angeschrieben werden in

ihren beiden Formen - mit dem Vierkomponenten-Spinor ψ von DIRAC als Feldgröße oder mit dem Zweikomponenten-Spinor χ von WEYL, und den entsprechenden DIRAC- oder PAULI-Matrizen γ und σ :

$$\gamma_\mu (\partial \psi / \partial x_\mu) + i^2 \gamma_\mu \gamma_\nu \psi (\psi \gamma_\mu \gamma_\nu \psi) = 0$$

$$i \sigma_\mu (\partial \chi_\mu) + i^2 \sigma_\mu \tau_k (\chi \sigma_\mu \tau_k \chi) = 0$$

Diese drei Beispiele aus dem späten Mittelalter, aus der klassischen Physik der Neuzeit und aus der neuen Physik des 20. Jahrhunderts mögen genügen, um die *im Programm des 7. Gesprächs über Erfolge und Grenzen der Mathematisierbarkeit gestellten Fragen beantworten zu können. Meine Thesis ist die Realgeltung mathematischer Strukturen in der physikalischen Wirklichkeit.* Zum Beweis möchte ich zwei eng zusammenhängende wissenschaftlich-philosophische Prinzipien anführen:

1. Prinzip der *Prognostizierungs-Erfüllung*: Was exakte Voraussagen des Eintreffens von späteren Beobachtungen realer Vorgänge und Gegenstände ermöglicht, muss selbst real sein. - Die Entdeckung der Trans-Uranus-Planeten Neptun (1846) und Pluto (1930), die Entdeckung neuer Elementarteilchen wie die des Positrons (1932), des Antiprotons (1955), des Omega-Hyperons (1964) und seines Komplementärteilchens (1970) ist eine schöne Bestätigung für die reale Gültigkeit mathematischer Strukturen.

2. Das alte *Kausalprinzip*, mit neuem Inhalt erfüllt: was Ursache von realen Wirkungen ist, w muss selbst real sein.

Damit stehen wir vor den Grundfragen einer *Ontologie des ideal-realen Seins*. Denn zweifellos sind nicht nur stofflich-materielle Körper und Vorgänge reale Ursachen. Die mechanistische Physik ist unzulänglich seit DEKOKRIT.

Die mehr als ein Jahrtausend alte Geschichte der heutigen *mathematischen Physik* wird durch zwei Grundströmungen bestimmt:

- *Erstens*: Die lange Geschichte des physikalischen *Kraft-Begriffs*, die im 6. Jahrhundert beginnt mit der "inneren Kraft", der "endotheisa dynamis" des JOANNES PHILOPONOS und die über arabische, hebräische und christliche Traditionen (die mittelalterlichen Begriffe des "impetus" und der "vis impressa"), vermittelt durch DESCARTES ("quantitas motus", Bewegungsgröße), LEIBNIZ ("vis viva", lebendige Kraft) und NEWTON schließlich hinführt zu dem modernen Begriff der *Energie* als der Fähigkeit, eine physikalische Arbeit zu leisten, das heißt, Kraft entlang eines Weges zu realisieren.

- *Zweitens*: Die Geschichte der allmählichen Auffindung und Entdeckung der *mathematischen Naturgesetze*. Ein Teil dieser Geschichte ist der Inhalt meines Vortrags. Werner HEISENBERG sagt davon: "Die Harmonien der Pythagoreer, die KEPLER noch in den Bahnen der Gestirne zu finden glaubte, sucht die Naturwissenschaft seit NEWTON in der mathematischen Struktur des dynamischen Gesetzes". Carl Friedrich von WEIZSÄCKER

fährt fort: "Die mathematische Form, in der Tat eine Art einer *causa formalis*, bleibt in der Physik als letzter fassbarer Gehalt unserer alten Kausalbegriffe übrig".

Die Synthese bringt der physikalische *Feldbegriff*. Seit dem Genius von FARADAY und MAXWELL haben wir die Wirklichkeit der *energetischen Felder* erkannt, die ein Inbegriff von physikalisch möglichen Wirkungen in einem Raumbereich sind (Definition von Fritz BOPP, meinem Lehrer für theoretische Physik an der Universität München). Mit der Entdeckung der physikalischen Felder (wir kennen heute drei: das elektromagnetische, das materielle und das gravitatorische Feld) hat die Physik ihre zentrale Aufgabe ganz nahe an die Seite der Philosophie gestellt, nämlich: die unsichtbaren Ursachen von sichtbaren Wirkungen zu suchen. Denn energetische Felder sind *immaterielle* physikalische Wirklichkeiten; "immateriell" in dem Sinne, dass sie als solche grundsätzlich nicht wahrnehmbar, sondern nur aus ihren Wirkungen erschließbar sind. Wir sehen nicht das elektromagnetische Feld, sondern die Dinge, die es beleuchtet. Wir greifen nicht das materielle Feld, sondern die Körper, die es erzeugt. Das kausale Real-Kriterium ist das alte Prinzip: "Sublata causa tollitur effectus":

Wenn Astronauten kein Gravitationsfeld mehr um sich haben, dann hat ihr Körper keine Schwere mehr und sie können im Raum herumschweben.

Physikalische Felder sind (nach einem passenden Ausdruck des Münchener Chemikers Hans Georg GRIMM) "*Energie-Strukturen*" oder "*strukturierte Energien*". Mit dem Wort "*Struktur*" meinen wir ein geordnetes System, ein Ordnungsgefüge von Relationen. Mathematik ist die Wissenschaft von logisch-rational möglichen Strukturen, Physik ist die Wissenschaft von *realisierten* mathematischen Strukturen. "Real" wird im Deutschen sinnvoll übersetzt mit "wirklich"; und die Dynamik möglicher Wirkungen ist der Sinn des physikalischen *Energie-Begriffes*.

"*Struktur*" hat ihren Ursprung im *idealen Sein* der Mathematik, "*Energie*" wurzelt im *realen Sein* der Wirklichkeit und Wirksamkeit. Beide Begriffe sind in der Wissenschaft des 20. Jahrhunderts so eng und untrennbar miteinander verbunden wie es einstmals in der aristotelischen Physik und Metaphysik die sogenannte Materie und die Form, Potenz und Akt, Möglichkeit und Wirklichkeit waren.

Schließen wir mit dem einfachsten der zitierten Beispiele, mit dem Gravitationsfeld: Natürlich ist das Schwerefeld der Erde verschieden von dem Feld der Sonne oder des Mondes; aber es gibt eine *reale Struktur*, die allen Schwerefeldern im Weltall *gemeinsam* ist, und die das - nur mathematisch darstellbare- *allgemeine Gravitations-Gesetz* zum Ausdruck bringt, sei es in der einfachen Form von NEWTON, sei es in der komplizierten Form von EINSTEIN, die aber strukturell isomorph sind.

Die mathematisch-physikalischen Strukturen sind somit die neuen Repräsentanten der "*Universalien in re*"; und damit sind wir bereits beim Thema des B. Gesprächs. Die übrigen Fragen im Themenbereich, die auf den Titel und Inhalt des schönen Buches des Bonner Mathematikers, Historikers und Philosophen Oskar BECKER hinauslaufen: "*Größe und*

Grenzen der mathematischen Denkweise", möchte ich gerne einer allgemeinen Diskussion anheimgeben.

ABSTRAKT in Englisch

Mathematical Structures in the Physical Reality, Ontology of the Ideal-real Being.

The successes of the mathematical Physics can only be understood because they conceive an essential character of the real world, that is its structural and rational constitution.

The laws of nature which can be expressed by Mathematics are a discovery - and not an Invention - of the mind.

To prove it, three examples from History of Science, from the fourteenth century until the present time, are being discussed. The conclusion is the following:

The three types of energetic fields that are actually known - the electro-magnetic, the material and the gravitational field- are the new representatives of the Universals, of the "universalia in re".

ABSTRAKT in Französisch

Structures mathématiques dans la réalité physique, sur l'ontologie de l'être réel-idéal.

Les succès de la conception mathématique du monde seulement peuvent être compris parcequ'ils conçoivent un caractère essentiel de la réalité, c'est-à-dire sa constitution structurelle et rationnelle.

Les lois de la nature qui s'énoncent dans les formules mathématiques représentent une découverte, mais pas une invention, de l'intelligence.

Pour le prouver se discutent trois exemples de l'histoire de la science, dès le quatorzième siècle jusqu'à l'actualité. Le resultat est le suivant:

Les trois types des champs énergétiques que nous connaissons aujourd'hui, - le champ électromagnétique, le champ matérielle et le champ gravitationnel -, son les neufs représentants des universaux, des "universalia in re".

ABSTRAKT Spanisch

Estructuras matemáticas en la realidad física, sobre la ontología del ser ideal-real.

Los éxitos de la concepción matemática del mundo tan sólo pueden entenderse porque con ésta se comprende un rasgo esencial de la realidad, a saber, su constitución estructural-racional.

Las leyes de la naturaleza que pueden expresarse en fórmulas matemáticas son un descubrimiento - y no una invención - del espíritu. Para comprobarlo, se discuten tres ejemplos históricos, desde el siglo XIV hasta la actualidad. La conclusión es la siguiente: los tres tipos de campos energéticos que conocemos hasta hoy - el campo electromagnético, el material y el gravitatorio -, son los nuevos representantes de los "universalia in re".