

# Lockende Schönheit Erkenntnis und Ästhetik

Hartmann Römer

Physikalisches Institut der Universität Freiburg  
<http://omnibus.uni-freiburg.de/~hr357>

Offenburg, 26. 10. 2019

# Zur Lage der Elementarteilchenphysik

- Seltsames Dilemma: Das mehr als vierzig Jahre alte **Standardmodell** der Elementarteilchenphysik wird trotz erkennbarer Unvollkommenheiten auch durch neueste Experimente am CERN **immer wieder bestätigt**.
- In **Ermangelung experimenteller Hinweise** müssen sich die Theoretiker bei der Verbesserung des Standardmodells an **andere Leitlinien** halten: Konsistenz, „großer Wurf Stringtheorie“, „Natürlichkeit“, Ästhetik (?)

SABINE  
HOSSENFELDER

# DAS HÄSSLICHE UNIVERSUM

Warum unsere  
Suche nach Schönheit  
die Physik in  
die Sackgasse führt

S. FISCHER



# Vorschau

- Ästhetik: Was kann und sollte man unter Schönheit, besonders unter Schönheit einer physikalischen Theorie verstehen?
- Fallstudien an verschiedenen physikalischen und anderen Theorien
- Ästhetik und Erkenntnis: Welche Erkenntnis leitende Funktion kommt ästhetischen Betrachtungen zu? In anderen Worten. Was ist das Verhältnis von Schönheit und Wahrheit?
- Zur Lage der zeitgenössischen Elementarteilchenphysik

# Ästhetik 1 (Kant)

- Unterscheidungen: Naturschönheit vs. Kunstschönheit und Objektästhetik vs. Wirkungsästhetik
- Objektästhetik: Kant (Kritik der Urteilskraft)
  - Autonomie des schönen Objektes, das, im Gegensatz zum bloß gefälligen, keinem äußeren Zweck untergeordnet ist: „uninteressiertes, freies Wohlgefallen“
  - Inneres Anliegen wird in perfekter Weise erfüllt: „formale Zweckhaftigkeit, d.i. Zweckmäßigkeit ohne Zweck“
  - Inneres Anliegen nicht immer voll einsichtig (Rest von Änigmatik), aber Verstand wesentlich beteiligt

# Ästhetik 2 (Schiller)

- Schiller: Schönheit als „Freiheit in der Erscheinung“:
- Freiheit in der Wahl des ästhetischen Anliegens
- Freiheit in der Erfüllung des Anliegens, die ganz anders hätte ausfallen können, aber so, wie sie ist, den Stempel der Vollkommenheit trägt. (Wieder Änigmatik)
- Eindruck der Einfachheit und Mühelosigkeit, gelungene Versöhnung von Freiheit und Notwendigkeit

*„Nicht der Masse qualvoll abgerungen  
Schlank und leicht, wie aus dem Nichts gesprungen  
Steht das Bild vor dem entzückten Blick“*

# Wirkungsästhetik

- Die Beziehung eines ästhetischen Objektes zu seinem Betrachter kann selbst einer ästhetischen Analyse unterzogen werden. **Der Freiheit in der Erscheinung abträglich sind Berechnung, Erzwingung, Propaganda, platte unänigmatische Eindeutigkeit.**
- **Ästhetisches Erleben oft mit Gefühl der Erhabenheit verbunden:** Ergriffenheit, Überwältigung durch Autonomie, die menschliches Bedürfnis als klein und unerheblich erscheinen lässt. Das kann bis zum Erschrecken gehen:

*„Denn das Schöne ist nichts als des Schrecklichen Anfang,  
den wir noch grade ertragen,  
und wir verehren es so, weil es gelassen verschmäht, uns zu  
zerstören.“*

# Schönheit physikalischer Theorien

- Schönheit wegen Abstraktheit von der gewohnten Welt und Mathematisierung nicht leicht zugänglich.
- Naturschönheit oder Kunstschönheit?
- „Interesseloses Wohlgefallen“ gegeben, da Naturgesetze sicher nicht für den Menschen gemacht sind.
- Anliegen: Effiziente Modellierung eines möglichst großen Bereiches der physikalischen Welt umso besser erfüllt, je umfassender der Anwendungsbereich und je klarer und vollständiger die mathematische Beschreibung seiner Gesetze. Damit auch Freiheit in der Erscheinung, Eleganz, Einfachheit und Tiefe durch überraschende Einblicke und Konsequenzen
- Eindruck der Erhabenheit mit allen Folgen

# „Kontingenzen“ in der Physik

- Kontingenzen in der Form der Naturgesetze, die sich etwa in unerklärten freien Parametern („Naturkonstanten“) äußern, vermindern den Anwendungsbereich, ist also unter ästhetischen Gesichtspunkten störend, aber wohl nie ganz zu vermeiden. Tendenz zur Verminderung von Kontingenzen in der Geschichte der Physik.
- Kontingenzen in den Anwendungen als Zeichen für Größe des Anwendungsbereiches wünschenswert. („Anfangsbedingungen“)

# Zur „Anschaulichkeit“ der Physik

- Physikalische Gesetze sind, wie gesagt, nicht für uns gemacht und daher nicht unmittelbar anschaulich. Allerdings gilt die Newtonsche Mechanik inzwischen als anschaulich.
- Die Forderung nach Anschaulichkeit im Namen des „gesunden Menschenverstandes“, die sich aggressiv in Angriffen auf Relativitäts- und Quantentheorie äußert, zieht das Gefällige dem Schönen vor und führt zu Theorien, die zurechtgebogen statt zwanglos, schwerfällig statt elegant, primitiv und simplizistisch statt einfach sind.
- Anschaulichkeit ist auch eine Frage der Gewöhnung.

# Newton'sche Mechanik und Gravitationstheorie

- Einfache Newton'sche Gesetze für die Bewegung materieller Körper ( $K=mb$ ,  $K_{1,2}+K_{2,1}=0$ )
- Zusammen mit dem Gravitationsgesetz  $K=m_1m_2/r^2$  werden die Bewegungen eines fallenden Apfels, des Mondes um die Erde und der Erde durch die Sonne alle durch die Newton'sche Gravitationstheorie im Détail beschrieben.
- A. Popes: „*Nature and Nature's Laws lay hid in Night  
God said let Newton be and all was Light*“
- Zugewinn an Schönheit in der weiteren Entwicklung: Lagrangesches Prinzip der kleinsten Wirkung, Energiesatz, Zusammenhang von Symmetrien und Erhaltungssätzen durch Noethersches Theorem (1918)

# Elektrodynamik 1

- Über den ganzen Raum ausgebreitete Felder statt Punktteilchen als physikalische Objekte, Einfluss der romantischen Naturphilosophie
- Oersted: Magnetfeld zu elektrischem Strom
- Faraday: Induktion eines elektrischen Feldes durch ein veränderliches Magnetfeld
- Maxwell 1864: Magnetfeld zu veränderlichem elektrischen Feld, **Maxwellsche Gleichungen**, **Licht als elektromagnetische Welle**, **Vereinigung von Elektrizität, Magnetismus und Optik**

# Elektrodynamik 2

Die volle Schönheit und Tiefe der Maxwellschen Theorie zeigte sich in der weiteren Entwicklung:

- Heinrich Hertz: Nachweis elektromagnetischer Wellen 1886, heutige Form der Maxwellschen Gleichungen
- L. Boltzmann: „*War es ein Gott, der diese Zeilen schrieb?*“
- Einstein: Lorentz-Invarianz der Maxwellschen Gleichungen (  $dF=0$ ,  $\delta F=J$  )
- Lagrangesches Prinzip für Maxwellsche Gleichungen
- Symmetrie der Eichinvarianz als konstitutives Prinzip der Maxwellschen Theorie, Ladungserhaltung als Folge der Eichinvarianz, Verallgemeinerung zu „nicht-Abelschen Eichtheorien“

# Spezielle Relativitätstheorie

- Leitgedanke Einsteins: Konstanz der Lichtgeschwindigkeit: Die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  des Lichtes ist unabhängig von der Geschwindigkeit der Quelle und des Beobachters.
- Bald elegante Formulierung durch Minkowski
- Naturgesetze müssen invariant unter Lorentz-Transformationen sein.
- Die Maxwell'schen Gleichungen sind bereits Lorentz-invariant, für die Newton'sche Mechanik wird eine Änderung der Ausdrücke für Impuls und kinetische Energie erzwungen, die sich aber erst für sehr große Geschwindigkeiten bemerkbar macht. Dadurch  $E=mc^2$

# Allgemeine Relativitätstheorie

- Leitprinzip: Gleichheit von träger und schwerer Masse, „allgemeine Kovarianz“ (verschwommen)
- Frühe Bestätigung durch Periheldrehung des Merkur und Lichtablenkung bei Sonnenfinsternis
- Volle Schönheit als geometrische Gravitationstheorie trat immer klarer hervor. Raum und Zeit nicht nur Bühne, sondern auch Akteure des physikalischen Geschehens
- Tragweite übertrifft alle Erwartungen. Auch exotische Konsequenzen wie schwarze Löcher und Gravitationswellen glänzend bestätigt. Es gibt kein experimentelles Resultat im Widerspruch zur ART

# Quantentheorie

- Die Quantenmechanik entstand aus dem Bemühen um das Verständnis atomarer Spektrallinien. Ausgangspunkt Bohrsches Atommodell.
- **Verworrene Entdeckungsgeschichte** ohne klares Grundprinzip. **Die Entdeckung ihrer im Nachhinein einfachen und eleganten Struktur ist geradezu ein Wunder.** Sie entsprang aus der Erkenntnis der Äquivalenz von Heisenbergscher Matrizenmechanik und Schrödingerscher Wellenmechanik.
- **Völlig neue Vorstellung von der physikalischen Realität**
- **Tragweite übertraf alle Erwartungen. Auch scheinbar absurde Konsequenzen werden immer wieder bestätigt. Keine Gültigkeitsgrenzen in Sicht.**

# Quantenfeldtheorie

- Quantenmechanik ist die Quantentheorie zu Systemen von Punktteilchen.
- Formulierung einer Quantentheorie zu Feldsystemen zwischen 1930 und 1950 war unerwartet schwierig. Probleme mit Unendlichkeiten durch Renormierungstheorie gelöst.
- Teilchen treten in Quantenfeldtheorien von selbst als Feldquanten auf
- Die Eichtheorien, die für die Elementarteilchenphysik herangezogen werden, sind alle renormierbar.
- Die ART widersetzt sich einer renormierungstheoretischen Behandlung.

# Schönheit wissenschaftlicher Theorien

- Die genannten Theorien erfüllen eindeutig die Kriterien für Schönheit.
- Physik: Schönheit nimmt tendenziell für weniger fundamentale Theorien ab. Z.B. Klimamodell
- Mathematik: **Mathematische Schönheit ist der physikalischen ähnlich**, aber anderer Wirklichkeitsbezug. Verwandt mit Musiksicherheit. Keine Theoriehierarchie.
- **Nationalökonomie, dialektischer und historischer Materialismus**. Fragen: Interessellosigkeit des Wohlgefallens, Richtigkeit der Modellierung, Richtigkeit der Schlüsse?
- **Interessanter Fall: Darwinismus**
- **Theorien zu Psi??**

# Symbolisierung

- „Phänomenalität der Welt“: Alles, was für uns irgendwie der Fall ist, ist uns zunächst nur so und insoweit gegeben, als es auf unserer inneren Bühne erscheint.
- Was uns erscheint, sind nicht „Dinge“, sondern Repräsentationen.
- **Symbolbeziehung** als Verhältnis zwischen Repräsentation und Repräsentiertem. **Keine einfache Etikettierung, sondern wechselseitig konstitutiv** und „verschränkungsartig“
- Mensch als Sprachwesen, Symbolisierung als Begriffsbildung, **Symbolisierung höherer Ordnung: Symbole von Symbolen. Keine symbolfreie Anschauung**
- **Kulturelles Gehäuse als Symbolsystem.** J.G. Hamann:  
*„In Bildern, nichts als Bildern besteht die ganze Substanz menschlicher Erkenntnis und Glückseligkeit“*

# Modellierung

- Modellierung: Bereich, Abstraktion, Begriffe / Symbolisierungen, Gesetze (mehr oder weniger explizit)
- Physik: Verzicht auf Introspektion, wenige intersubjektiv und reproduzierbar operationalisierbare Begriffe, Gesetze in mathematischer Form. Spektakulär erfolgreich, lernfähig, nicht universell anwendbar
- Modellbildung in allen Teilen freier kreativer Akt
- Modellierungen sind wahrheitsfähig und wahrheitshaltig.
- Denken als Modellieren. Wahrheitsfähigkeit zeigt sich in der Möglichkeit des Irrtums.
- Erkenntnisse aus Modellierungen weder nur gefunden noch nur erfunden
- Kein Modell beschreibt das „Weltganze“. Identifizierung von Modell und Modelliertem grob fehlerhaft

# Schönheit und Wahrheit

- „Interesseloses Wohlgefallen“ bei Modellierung: Ergebnisoffenheit
- „Zweckmäßigkeit ohne Zweck“ und „Freiheit in der Erscheinung“: Ungezwungenes, scheinbar müheloses Gelingen der Modellierung
- **Schönheit** liegt im Gelingen und **ist von der Wahrheit der Modellierung nicht zu trennen.**
- Ähnliche Verhältnisse bei Kunstschönheit: „Gelingen“
- Ästhetizismus als frivole „Schönheit ohne Wahrheit“
- **Denkfähigkeit als Sinnesleistung** („Wahrheitssinn“, Evolution). **Schönheitserlebnis als Lohn und Ansporn ähnlich wie Lust bei weniger symbolisierender Wahrnehmung.**
- Kant: *„Die schönen Dinge zeigen an, dass der Mensch in die Welt passe...“*

# Standardmodell der Teilchenphysik

- Renormierbare Quantenfeldtheorie: Eichtheorie für elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkungen, zusätzlich Higgs-Feld
- Bestandteile:  $3 \times 2$  „Quarks“,  $3 \times 2$  Leptonen,  $1+3+8$  „Eichbosonen“, Higgs-Feld
- 25 freie Parameter:  $6+6+1$  Massen, 4 Kopplungskonstanten,  $2 \times 3$  Mischungswinkel, 2 Phasen
- Im **Détail immer wieder bestätigt**, nicht nur in unmittelbaren, sondern auch in hoch abgeleiteten Konsequenzen, die von Einzelheiten der Quantenfeldtheorie Gebrauch machen. Beispiel: Higgs-Sektor

# Einige „Mängel“ des Standardmodells

1. Nur 5% der Energie/Materie des Universums von der uns bekannten Form, 20% „dunkle Materie“ und 75% „dunkle Energie“ unentdeckt und unidentifiziert. Ob und wie sie im Standardmodell Platz finden, ist nicht bekannt.
2. Elektromagnetische und schwache WW vereinigt zu „elektroschwacher WW“, starke WW bleibt für sich.
3. 25 freie Parameter: Überschuss an Kontingenz
4. Higgs-Sektor ist keine Eichtheorie
5. Gravitationswechselwirkung bleibt außerhalb des Standardmodell. Zugehörige Quantentheorie unbekannt

# Supersymmetrie

- Erweiterte Symmetrie die Teilchen und Kräfte vereint. Beitrag zur Lösung von 1. bis 4. erhofft
- Aber: Zu jedem Feld des Standardmodells müsste es einen supersymmetrischen Partner geben. Bisher wurde keiner gesehen.
- Aussage: *„Die Supersymmetrie ist so schön, dass die Natur von ihr Gebrauch machen muss“*
- Aber: Mathematik der Supersymmetrie nicht schöner als andere mathematische Theorien. Schönheit als physikalische Theorie nicht von der Wahrheit zu trennen.
- Supersymmetrie muss gebrochen sein. Theorie der Brechung unelegant und willkürlich

# Stringtheorie

- Leitvorstellung: Fundamentale Objekte nicht Punktteilchen, sondern offene oder ringförmig geschlossene fadenförmige „Strings“. Stringtheorie als Quantentheorie dazu. Elementarteilchen als quantisierte Schwingungsmoden der Strings.
- Ehrgeizige „Theorie von Übermorgen“ Lösungen zu 1. bis 5. erwartet. Stringtheorie sollte Quantengravitation enthalten.
- Supersymmetrie tief in den Fundamenten verankert.
- Zahlreiche mathematische Konsistenzerlebnisse wecken den Eindruck unausgeloteter Tiefe. Interessantes Teilergebnis für Entropie schwarzer Löcher.
- Höherdimensionale Gebilde, „Branes“, treten zwangsläufig auf.

# Probleme mit Stringtheorie 1

- Höhere Anregungen und experimentelle Konsequenzen erst bei Energien, die um viele Größenordnungen jenseits des im Labor Erreichbaren liegen.
- Auch kosmologische Signaturen unklar.
- Stringtheorie existiert weder als klar formulierte mathematische noch als bestätigte physikalische Theorie. Anspruch auf math. oder phys. Schönheit unfundiert.
- Aus Konsistenzgründen müssen Strings in neun Raumdimensionen schwingen. Sechs für erreichbare Energien unbeobachtbare Dimensionen müssen in sehr kleinen Skalen „aufgerollt“ werden. „Kompaktifizierung“.

# Probleme mit Stringtheorie 2

- Es gibt mehr als  $10^{500}$  verschiedene Möglichkeiten der Kompaktifizierung, zu jeder Kompaktifizierung gehören andere Grundgesetze der Teilchenphysik.
- Es ist keine Kompaktifizierung bekannt, die zum Standardmodell führt. Unbekannt ist, was das Standardmodell in der Stringtheorie auszeichnet.
- Wenn wirklich alle Kompaktifizierungen gleichwertig sind, dann sind die Gesetze der Teilchenphysik kontingent wie Anfangsbedingungen in den etablierten Theorien. Warum dann nur 25 Parameter?
- Es gäbe dann nur eine „Landschaft“ möglicher Theorien, die eventuell in prinzipiell unbeobachtbaren Bereichen eines „Multiversums“ realisiert wären.
- Das wird von Enthusiasten als Tugend angesehen. Ein solcher Verzicht auf Vorhersagekraft m.E. nur als zwingende Konsequenz einer bestens bestätigten Theorie annehmbar.

# Fazit 1

- Die Schönheit physikalischer Theorien ist von ihrer Wahrheit nicht zu trennen. Sie steht nicht am Anfang, sondern als Lohn am Ende der Theoriebildung. Sie ist ein mächtiger Antrieb für die Arbeit des Forschers.
- Der Versuch, den Lohn der Schönheit vorwegzunehmen, etwa durch Fixierung auf einen als besonders schön bevorzugten mathematischen Formalismus, ist illegitim und führt mit hoher Wahrscheinlichkeit in die Irre.
- Noch weniger als vorweggenommene Schönheit ist vorweggenommene Hässlichkeit ein verlässlicher Leitfaden. Insbesondere führt simplizistische Theoriebildung unter dem Anspruch auf Anschaulichkeit und aggressivem Pochen auf „gesunden Menschenverstand“ so gut wie nie zur Wahrheit.

# Fazit 2

- Das Standardmodell könnte noch für längere Zeit die Theorie der Wahl sein. Die gegenwärtige empfundene Stagnation der Elementarteilchentheorie ist keine Katastrophe, sondern entspricht vielleicht den Wehen vor einem größeren Durchbruch.
- Geduldige, weniger spektakuläre **Detailarbeit** an der Vertiefung des Modells und an Präzisionsexperimenten ist verdienstvoller als Spekulationen über Multiversen.
- **Andere Zweige der Physik in voller Blüte**. Z.B. **Quantenoptik**, in der die Quantentheorie gerade in ihren als bizarr erscheinenden Zügen endgültig Teil des Alltags wird und zu Anwendungen drängt, oder **Kosmologie**, die viele Verbindungen zur Elementarteilchenphysik aufweist und wichtige Aufschlüsse auch für diese erwarten lässt.

# Fazit 3

- **Vielfältiges Explorationsverhalten ist zu fördern** und die Suche nicht auf die Verfolgung weniger Ansätze zu verengen. In den jahrzehntelangen Bemühungen um die Stringtheorie haben sich Strukturen gebildet, die zu Konformismus und Dogmatismus verleiten können. Diese Entwicklung wird zu Recht von S. Hossenfelder beklagt. **Ihr ist durch eine Forschungsförderung gegenzusteuern**, die Forschungsmittel und Karrierechancen nicht zu sehr nach der Zahl der Publikationen und Zitate gewährt, sondern auch unkonventionelle Ansätze in angemessener Form zu Wort kommen lässt.

# Fazit 4

- Das Potential der einfachen und fruchtbaren Erkenntnisstrategie der Physik ist keineswegs erschöpft. Schöne und tiefe Einsichten sind zu erwarten, vorausgesetzt, dass die wissenschaftliche Neugier nicht erlahmt und einem verständnislosen Nützlichkeitsdenken das Feld überlässt.
- Ein reduktionistischer Anspruch auf ein Erklärungsmonopol der Physik ist mit Sicherheit schon deshalb **verfehlt**, weil hierin eine unzulässige Identifizierung von Modell und Modelliertem vorläge. Auch kann es **keine die Physik übersteigende, etwa die Erkenntnistheorie einbeziehende Einheitswissenschaft** geben, aus der sich alle Tatsachen ableiten ließen. **Es führt kein Weg an der Anerkennung der Wahrheit vorbei, dass umfassenderes Weltverständnis nur multiperspektivisch möglich ist.**