

---

# 1 Einleitung

„Was ist Realität?“ Diese Frage hat den Menschen seit jeher bewegt. Die Suche nach einer Antwort findet Ausdruck in Philosophie [1] und Religion [2], in Kunst und Literatur. Für die Wissenschaft - speziell die Physik - ist „Realität“ eng mit dem Messprozess verknüpft. Was sich nicht qualitativ oder quantitativ untersuchen lässt, liegt außerhalb des wissenschaftlichen Erfassungsbereiches. Umso verständlicher ist der Schrecken und der Unglaube, der die Wissenschaft zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts ergriff, als die noch junge Quantentheorie den Messprozess in einem völlig neuen Licht darstellte. Nach dieser bildet eine Messung die physikalische Realität nicht nur ab, sondern beeinflusst gleichzeitig auch ihre Gestalt. Damit nicht genug: Bestimmte Messgrößen sind bereits in der Theorie zueinander inkompatibel. So zeigte Heisenberg 1927, dass - entgegen der Verhältnisse in der klassischen Physik - die Quantenmechanik die exakte Kenntnis der Werte zweier Größen, deren zugehörige Operatoren nicht kommutieren, nicht gleichzeitig zulässt. Dies findet unter anderem in der Orts-Impuls-Unschärfe Ausdruck - der wohl bekanntesten Formulierung der Heisenberg'schen Unschärferelation [3]. Im Jahr 1931 stellte von Weizsäcker diesbezüglich einen interessanten Gedankengang an, als er Heisenbergs Vorschläge für ein Röntgenmikroskop untersuchte. Wenn zwei Teilchen - ein Photon und ein Elektron - in definierten Ausgangszuständen (bezüglich des Impulses oder des Ortes) vorliegen, so müssten sich nach von Weizsäckers Überlegungen nach deren Streuung aneinander durch die Untersuchung des Impulses beziehungsweise des Ortes des einen Teilchens Rückschlüsse auf den Impuls beziehungsweise den Ort des anderen zum Zeitpunkt des Streuprozesses ziehen lassen, was eine Möglichkeit zur Umgehung der Unschärfe aufweist [4]. Weizsäcker führte diese Ideen nicht weiter aus, aber es sind schon erste Ansätze des Gedankenexperimentes zu sehen, das vier Jahre später die Diskussionen um die Realität in der Quantentheorie weiter anheizen sollte.

„Can the quantum-mechanical description of reality be considered complete?“ fragte Einstein in einer Veröffentlichung im Jahr 1935, die er zusammen mit seinen Kollegen Podolsky und Rosen (EPR) erarbeitet hatte und die als „EPR-Paradoxon“ in die Geschichte der Physik eingegangen ist [6]. Ähnlich der Ansätze von Weizsäcker - jedoch filigraner konstruiert - führen EPR einen „verschränkten“ Zustand zweier Teilchen zum Widerspruch gegen die Orts-Impuls-Unschärfe und folgern die Unvollständigkeit der Quantentheorie. Sind zwei Teilchen in Ort und Impuls verschränkt, lässt sich durch Messung des Impulses (Ortes) des einen Teilchens auf den Impuls (Ort) des anderen schließen, obwohl diese Informationen nicht direkt in der entsprechenden Wellenfunktion enthalten sind. Das heißt entweder können die beiden Teilchen durch irgendeine „geisterhafte“ Fernwirkung miteinander kommunizieren, was eine Aufgabe der klassischen Lokalität bedeutet, oder die Quantenmechanik muss um „verborgene“ Parameter (local hidden Variables,

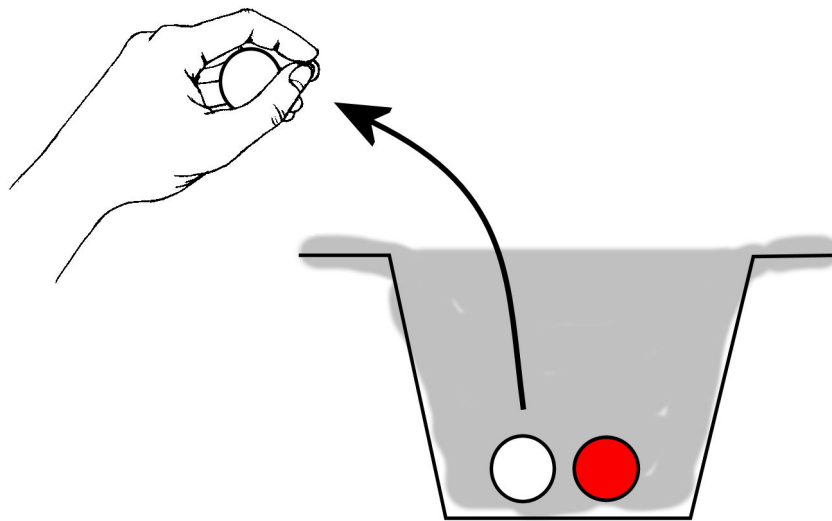


Abb. 1.1: Klassisches Analogon zum EPR-Paradoxon: In einem Gefäß befinden sich zwei Bälle - ein roter und ein weißer. Ein Ball wird blind gezogen. Nach der Bestimmung seiner Farbe ist auch die Farbe des im Gefäß verbliebenen Balls bekannt. Bell erklärt die philosophische Bedeutung des EPR-Paradoxons anhand der Gewohnheiten seines Forscherkollegen Dr. Bertlmann. Dieser pflegte immer Socken unterschiedlicher Farbe zu tragen, so dass die Kenntnis der Farbe eines Socken (zum Beispiel: pink) Rückschlüsse auf die Farbe des zweiten (nicht pink) zulässt [5].

kurz: LHV) erweitert werden, um die Wellenfunktion zu vervollständigen. Die Behandlung dieses Paradoxons entzog sich lange der experimentellen Betrachtung und verblieb rein philosophischer Natur (Abbildung 1.1) bis Bell im Jahr 1964 [7] aufbauend auf den theoretischen Arbeiten von Bohm und Aharonov [8, 9] in der Messung der statistischen Korrelationsstärke eine Möglichkeit fand, die Aussagen von LHV-Theorien von denen der Quantentheorie experimentell zu unterscheiden. Aus dieser Betrachtung und den nachfolgenden Umformulierungen und Erweiterungen [10–12] ging eine Klasse von Ungleichungen hervor, die heute als Bell'sche Ungleichungen bekannt sind. Sie alle beschreiben den selben Sachverhalt: Die statistischen Korrelationsstärken sind in der Quantentheorie höher als in lokal realistischen Theorien.

Seitdem wurde eine Vielzahl von Bell-Experimenten durchgeführt. Die meisten verwenden verschränkte Photonen aus atomaren Kaskaden [13] oder parametrischen Abwärtskonversionsprozessen [14], aber es gibt auch Ansätze mit verschränkten  ${}^9\text{Be}^+$ -Ionen- [15],  $B^0 - \bar{B}^0$ - [16] oder Photon-Atom-Paaren [17]. Die Ergebnisse der überwiegenden Zahl der bislang durchgeführten Experimente fallen zugunsten der Vollständigkeit der Quantenmechanik aus, jedoch ist es bislang noch nicht gelungen alle experimentellen Imperfektionen auszuräumen, die theoretische *Schlupflöcher* für LHV-Theorien offen lassen. Die Konzeption eines

---

schlupfloch-freien Bell-Experimentes stellt hohe Anforderungen an die räumliche Korrelation der verschränkten Teilchen sowie die Detektionseffizienz und Lokalität der Detektoren. Eine Möglichkeit zur Realisierung eines solchen Experimentes bieten die Arbeiten von Fry et al. [18] und deren Erweiterungen. Die Idee ist dabei, aus ultra-kalten  $^{199}\text{Hg}$ -Atome in einer magneto-optischen Falle [19] mittels Photoassoziation Van-der-Waals-Moleküle zu bilden. Durch kontrollierte Dissoziation lassen sich daraus wieder zwei  $^{199}\text{Hg}$ -Atome erzeugen, die im Spin verschränkt sind. Ein resonanter, zwei-stufiger Ionisationsprozess ermöglicht die spin-selektive Detektion der beiden Teilchen mit einer Effizienz von nahezu 1.

Die Arbeiten, die im Zuge der vorliegenden Dissertation durchgeführt wurden, tragen einen wichtigen Teil zu diesem neuartigen Bell-Experiment bei, das eine endgültige Antwort auf EPR geben kann [20]. Sie beziehen sich vorrangig auf die Entwicklung, den Bau und die Erprobung des Detektors sowie der Strahlquelle für die Erzeugung der benötigten Ionisationsstrahlung.

Bei der Strahlquelle handelt es sich um ein innovatives, flexibles Ti:Saphir-Verstärkersystem, das im Prinzip auf zwei (oder mehr) beliebigen Wellenlängen innerhalb des Verstärkungsbereiches zwischen 660 nm und 1100 nm betrieben werden kann und dabei Pulsenergie im mJ-Bereich erzeugt. Die Bandbreite ist nahezu fourierlimitiert. Strahlqualität und zeitliche Pulsform sind in guter Näherung gauss-förmig, was Frequenzkonversionen hoher Effizienz ermöglicht. Prinzipiell ist der Betrieb bei nahezu beliebigen Pulsrepetitionraten denkbar. Im eigentlichen Detektorsystem kommen langlebige Kanal-Elektronen-Vervielfacher mit hohen Verstärkungen im Bereich von  $10^9$  in Kombination mit modularen elektrostatischen Optiken zum Einsatz, die für die Anpassung von Detektionsbereich und kinetischer Energie der Teilchen zuständig sind.

Die hohe stoffbezogene Selektivität in Verbindung mit der äußerst geringen Nachweisgrenze von einigen wenigen Atomen machen das Detektorsystem neben dem angestrebten Bell-Experiment mit Quecksilber für eine Vielzahl anderer Anwendungsgebiete interessant. So lassen sich beispielsweise schon kleinste Spuren von Quecksilberverunreinigungen in Proben nachweisen, was den Einsatz in der Umweltphysik - beispielsweise bei der Detektion und Elimination von Quecksilberkontaminationen in Industrieabgasen - denkbar macht. In Kombination mit der variablen Laserquelle und der Verfügbarkeit einer Vielzahl hocheffizienter Schemata zur resonanten Ionisation werden Gasanalysen mit hoher Empfindlichkeit und Element- und Isotopen-bezogener Auflösung über einen großen Frequenzbereich ermöglicht.

Die vorliegende Dissertation gliedert sich in sieben Kapitel zuzüglich Anhang. Nach dieser kurzen Einleitung - dem ersten Kapitel - wird in Kapitel 2 das angestrebte Bell-Experiment detaillierter beschrieben. Neben einer historischen Einleitung in die EPR-Debatte finden sich dort eine Ideenskizze des Experimentes, eine Einführung in die resonante Ionisations- und PEPICO-Spektroskopie als Arbeitsprinzip des Detektors, eine Beschreibung des verwendeten Anregungsprozesses bei Quecksilber und einige Ausführungen zur Bestimmung der Detektionseffizienzen. Kapitel 3 ist ganz dem regenerativen Verstärker als Lichtquelle für die Ionisation gewidmet. Nach einem Überblick über das Gesamtsystem werden die

---

einzelnen Teilbereiche genauer spezifiziert und der Verstärker im Betrieb charakterisiert. Den Abschluss bildet nochmals eine Zusammenfassung der Spezifikationen des Systems. In Kapitel 4 wird das Detektorsystem bestehend aus den Kanal-Elektronen-Vervielfachern und den vorgeschalteten, elektrostatischen Optiken beschrieben. Ein Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung der letztgenannten Optiken und der Simulation der zu erwartenden Nachweiseffizienzen. Das Kapitel schließt mit einer Beschreibung der Signalverarbeitung und Messaufnahme, die mit einem selbstentwickelten Vielkanalanalysator auf Basis eines FPGAs erfolgt. Da der eigentliche Aufbau für das Bell-Experiment noch nicht verfügbar ist, wurde der Detektor in einem Testaufbau betrieben. Der Aufbau desselben wird in Kapitel 5 vorgestellt. Nachdem alle benötigten Einzelteile des Detektorsystems charakterisiert sind, werden in Kapitel 6 die durchgeführten Messungen am Gesamtsystem beschrieben und die erhaltenen Ergebnisse diskutiert. Nach einigen Probemessungen an Metalltargets werden Quecksilberatome unter niedrigem Dampfdruck untersucht. Dabei werden zunächst einige Messungen zur Isotopenselektivität durchgeführt, die zu einigen interessanten Erkenntnissen geführt haben, und anschließend Untersuchungen zur Spin-Selektivität und Ionisationsrate beschrieben. Den Abschluss dieses Kapitels bilden die Messungen zu den erreichten Detektionseffizienzen. Das siebte Kapitel, das gleichzeitig den letzten Abschnitt des Hauptteils darstellt, fasst die erlangten Erkenntnisse zusammen, diskutiert diese in Hinblick auf die zu Beginn der Arbeit beschriebenen Anforderungen für das Bell-Experiment und gibt einen Überblick über die nächsten Schritte im Gesamtprojekt.