



Muster, Symmetrien und der zerbrochene Spiegel

Ulrich Uwer

Auszug aus dem Jahresbericht
„Marsilius-Kolleg 2013/2014“



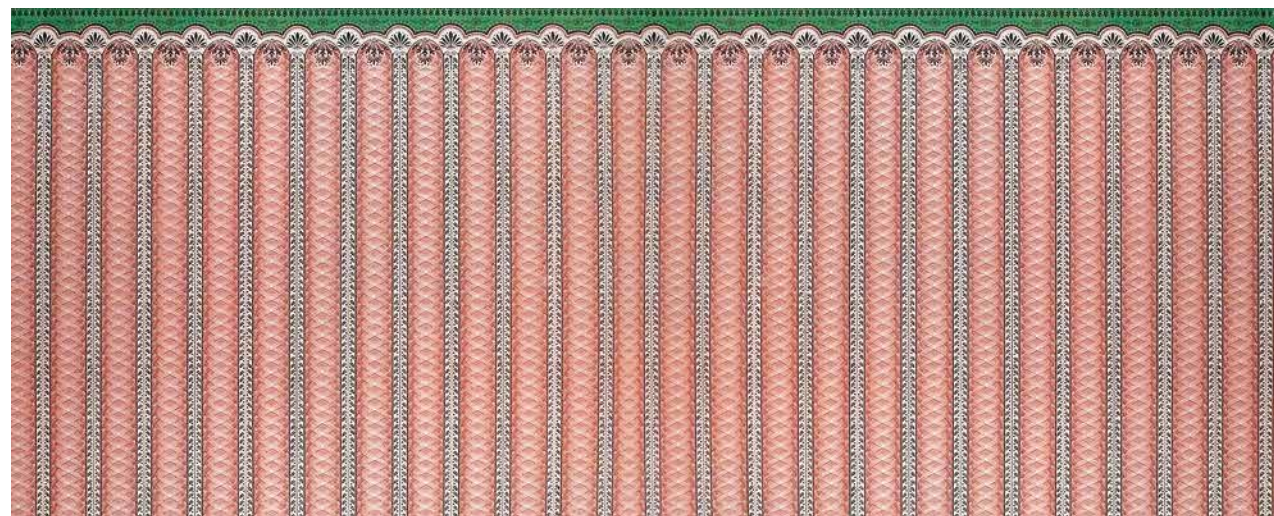
Muster in Natur-, Kultur- und Sprachwissenschaften war das Thema unserer vierköpfigen interdisziplinären Arbeitsgruppe der Marsiliusklasse 2013/14. Bereits beim ersten Treffen unseres Teams wurde deutlich, wieviel Spannendes die Sprach- und Kunswissenschaften, die Humangenetik und auch die Physik zu diesem Begriff beitragen können. Klar wurde aber auch, wie schwierig eine fächerübergreifende Definition des *Musterbegriffs* sein würde und welche

Muster, Symmetrien und der zerbrochene Spiegel

Ulrich Uwer

unterschiedlichen Aspekte in den einzelnen Disziplinen mit *Mustern* verbunden werden können. Mein eigenes Forschungsgebiet, die Untersuchung diskreter Symmetrien für Elementarteilchen, wie etwa der Test der Spiegelsymmetrie und der Test der Teilchen- Antiteilchen-Symmetrie, weist erst einmal keine direkte Verbindung mit *Mustern* auf. Allerdings spielt der Symmetrie-Begriff bei der Bewertung von *Mustern* und ihrem wiederholten Auftreten in größeren und ausgedehnteren Strukturen eine wichtige Rolle.

Schaut man sich die *Muster* einer Tapete oder eines Parkettfußbodens an, so wird man schnell Regelmäßigkeiten entdecken. Die Dekorelemente wiederholen sich über die tapezierte Fläche und ihre räumliche Anordnung genügt Gesetzmäßigkeiten. So können die Dekorelemente etwa einfach nur versetzt oder verschoben nebeneinander angeordnet sein. Aber auch kompliziertere Anordnungen mit Spiegelungen oder Drehungen der *Musterelemente* kann man auf Tapeten finden. Um ein Tapetenmuster zu klassifizieren, benutzt man verallgemeinerte Symmetrien. Kann man beispielsweise eine Tapete entlang der Wand verschieben und erhält danach die gleiche Anordnung des Dekors, so spricht man von Verschiebungs- oder Translations-Symmetrie. Dies ist z. B. für die abgebildeten Tapete des Marsilius-Sitzungssaales im Haus Buhl der Fall.



In gleicher Weise kann man untersuchen, ob das *Muster* unter einer Drehung (mit gegebenen Drehwinkel) oder unter einer Spiegelung (bezüglich einer gegebenen Achse) wieder in sich selbst übergeht, also ob die Tapete invariant unter der gewählten Symmetrieeoperation ist. Man spricht entsprechend von Rotations- oder Spiegelsymmetrie des Musters. Auch kombinierte Symmetrien (etwa Spiegelung und Verschiebung) sind möglich.

Die hier zur Beschreibung von Tapeten eingeführten geometrischen Symmetrien (Translations-, Rotations- und Spiegelsymmetrie) kann man auch zur Beschreibung physikalischer Systeme nutzen. Interessant ist dabei aber, dass mit den entsprechenden geometrischen Eigenschaften auch physikalische Erhaltungsgrößen verbunden sind, was von der Mathematikerin Emmy Noether bereits im Jahr 1918 allgemein gezeigt wurde,¹ und heute deshalb als Noether-Theorem bezeichnet wird. Ist ein physikalisches System beispielsweise rotationssymmetrisch (z. B. das Gravitationsfeld der Sonne) so gilt für alle Körper in diesem Feld der Drehimpuls erhalten. Ist ein System invariant unter einer Ortsverschiebung, so findet man, dass der Impuls der Teilchen erhalten ist und eine Invarianz gegenüber einer Zeitverschiebung korrespondiert zur Energieerhaltung des Systems.

Bei der Beschreibung des Mikrokosmos der Elementarteilchen spielen weitere verallgemeinerte Symmetrien eine wichtige Rolle. Hierzu gehören die Spiegelsymmetrie, die Ladungsumkehr und die Zeitumkehr. Während man zur Überprüfung der Spiegelsymmetrie den Elementarteilchenprozess tatsächlich spiegelt, tauscht man bei der Ladungsumkehr einfach negative und positive Ladungen aus und macht so beispielsweise aus einem Elektron ein Positron. Zeitumkehr bedeutet, dass man sich die Prozesse in umgekehrter Zeitrichtung anschaut, dass man also einen Film quasi rückwärts spult. Letzteres macht für (nichtabgeschlossene) makroskopische Systeme natürlich keinen Sinn. Ein auf den Boden fallendes und zerbrechendes Glas, das sich beim Rückwärtsspulen wieder zusammensetzt, widerspricht klar unserer Erfahrung. Für (abgeschlossene) mikroskopische Systeme hingegen, wie etwa der Stoß zweier Elementarteilchen, ist es erst einmal nicht klar, warum die Zeitumkehrinvarianz verletzt sein sollte. Lange Zeit dachte man deshalb, dass für Elementarteilchen und ihre gegenseitigen Wechselwirkungen die genannten drei Symmetrien erhalten sind, dass also eine Reaktion zwischen Elementarteilchen mit einer gespiegelten Konfiguration genauso ablaufen wie der ursprüngliche Prozess. Genauso sollte es möglich sein in den Prozessen die Ladungen zu vertauschen oder durch Anwendung der Zeitumkehr den Prozess in umgekehrter Zeitrichtung laufen zu lassen. Im Jahr

1957 wurde aber im radioaktiven Beta-Zerfall zum ersten Mal eine Verletzung der Spiegelsymmetrie beobachtet.² Wir wissen heute, dass es sich hierbei um eine Eigenschaft der zugrundeliegenden schwachen Wechselwirkung, die den Zerfall bewirkt, handelt. Diese Wechselwirkung hängt von der sogenannten Händigkeit der Elementarteilchen ab – die Teilchen besitzen einen inneren Drehsinn, und wie bei einem Korkenzieher kann dieser rechts- oder linkshändig sein. Im Spiegel betrachtet wird, wie jeder selbst bereits erfahren hat, aus einem rechtsdrehenden Gegenstand ein linksdrehendes Objekt. Für die schwache Wechselwirkung aber, mit ihrer Abhängigkeit vom Drehsinn der Teilchen ist *dieser Spiegel zerbrochen*. Und nicht nur das, die Natur verletzt im radioaktiven Beta-Zerfall in gleicher Weise auch die Ladungsumkehr.

Eine genauere Betrachtung führte allerdings schnell zur Erkenntnis, dass, sobald die schwache Wechselwirkung eine Rolle spielt, Spiegelsymmetrie und Ladungsaustausch gemeinsam betrachtet werden müssen. Das hintereinander Ausführen von Spiegelung und Ladungsaustausch entspricht dem Tausch von Teilchen und Anti-Teilchen, also dem Übergang von einer Welt, die aus Protonen und Elektronen besteht, zu einer Welt, die aus Anti-Protonen und Positronen besteht.

Diese Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie muss aber auch bei der Entwicklung unseres Universums verletzt worden sein. Nach dem Urknall zu Beginn der Entwicklung unserer Welt wurden Teilchen und Anti-Teilchen in gleicher Zahl produziert. Während des Abkühlens und Ausdehnens des Kosmos haben sich Teilchen und Antiteilchen größtenteils vernichtet und sind zerstrahlt. Anscheinend gab es aber Prozesse, die einen Überschuss an Teilchen bewirkt haben und ohne die der Materieüberschuss des Universums nicht zu erklären ist. Andrei Sacharow postulierte bereits 1967 deshalb die Verletzung der Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie als eine der Notwendigen Bedingungen zur Entstehung eines materiedominierten Universums.³ Ein *gebrochener Teilchen-Antiteilchen-Spiegel* konnte erstmalig im gleichen Jahr in einem Labor-Experiment nachgewiesen werden.⁴ Lange Zeit gab es aber nur ein einziges Elementarteilchen für dessen Zerfall die Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie verletzt ist. In den letzten Jahren konnte die *Brechung des Teilchen-Antiteilchen-Spiegels* mit Experimenten in Stanford, Japan und Genf aber noch in einem weiteren Teilchensystemen nachgewiesen werden. Aufgrund einer Vielzahl sehr genauer Messungen dieser Teilchenzerfälle, die unter anderem am Large Hadron Collider in Genf möglich sind, wissen wir heute, dass die beobachteten Effekte theoretisch sehr gut verstanden sind, dass aber ihre Stärke viele Größenordnungen zu klein ist, um die Materie unseres Universums

zu erklären. Nach mehr als 50 Jahren intensiver Untersuchungen der Verletzung von Spiegel- und Ladungs- und Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie im Mikrokosmos der Elementarteilchen fehlt uns leider immer noch eine experimentell bestätigte Erklärung der Materieasymmetrie unserer Welt.

Wie aus diesem Beispiel aus meinem eigenen Forschungsgebiet deutlich wird, helfen uns Symmetrien zum einen, die Natur besser zu verstehen und zu beschreiben. Zum anderen geht aber die Verletzung bestimmter Symmetrieeigenschaften von Strukturen und Systemen oft einher mit neuen Eigenschaften und Dynamiken der betrachteten Systeme. Die herausragende Bedeutung eines verallgemeinerten Symmetriebegriffs in die interdisziplinäre Diskussion der Mustergruppe mit einzubringen, war mir ein besonderes Anliegen.

Inspiziert durch den Vortrag von Thomas Holstein, in dem er unter anderem die Bildung biologischer Muster und die Entstehung von Körperachsen bei Tieren diskutierte, und angeregt durch die Fragestellung unserer Muster-Gruppe „*Warum bilden sich Muster*“, beschäftigte ich mich im Laufe des zweiten Semesters mit Arbeiten von Ilya Prigogine.⁵ Prigogine, der für seine Forschung 1977 den Nobelpreis in Chemie erhielt, hat ausführlich das kollektive Verhalten offener nicht-linearer Vielteilchensysteme, die sich fern vom thermodynamischen Gleichgewicht befinden, theoretisch untersucht. Durch kollektives Verhalten können dynamische Zustände mit hoher Ordnung entstehen. Hierbei wirkt die Nicht-Linearität des Systems stabilisierend gegenüber der Veränderung äußerer Parameter. Prinzipiell ist aber bei genügend starker Änderung der äußeren Parameter auch der Übergang zu einem chaotischen Zustand möglich. Die von Prigogine eingeführten „dissipativen Strukturen“ erklären Muster, wie sie bei Wasser oder Luftwirbeln, bei Sanddünen, bei der Ausbildung von Galaxien, aber auch bei chemischen oder biologischen Systemen oder im Verkehr zu beobachten sind. Auch wenn das Auftreten der Muster reproduzierbar ist, so hängt ihre exakte Gestalt aber von Fluktuationen ab. Mit der Ausbildung der dissipativen Strukturen ist immer auch der Verlust von Symmetrieeigenschaften des Systems und die Ausbildung neuer Eigenschaften verbunden.

Das Jahr im Marsilius-Kolleg war gleich in mehrerer Hinsicht für mich eine große Bereicherung: Die Diskussionen mit den Kolleginnen unserer *Mustergruppe* waren überaus anregend. Ausgelöst durch die Fragestellungen der Arbeitsgruppe, habe ich mich auch in meinem eigenen Fach mit einem neuen Thema beschäftigt, und nicht zuletzt waren die montäglichen Marsilius-Vorträge ausnahmslos interessant und exzellente Beispiele für die sehr unterschiedlichen Facetten der Universität Heidelberg.

¹ Vgl. Emmy Noether: *Invariante Variationsprobleme*, in: *Nachrichten der königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 1918, S. 235–257.

² Vgl. C.S. Wu et al.: *Experimental Test of Parity Violation in Beta Decay*, in: *Phys. Rev.* 195 (1957), S. 1413.

³ Vgl. A. D. Sakharov: *CP Symmetry Violation, C-Asymmetry and Baryonic Asymmetry of the universe*, in: *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fis.* 5 (1967), S. 32–35.

⁴ Vgl. J.H. Christenson et al.: *Evidence for the 2π Decay of the K_{20} Meson*, in: *Phys. Rev. Lett.* 13 (1967), S. 138.

⁵ Vgl. Gregoire Nicolis, Ilya Prigogine: *Die Erforschung des Komplexen. Auf dem Weg zu einem neuen Verständnis der Naturwissenschaften*. Deutsche Ausgabe bearbeitet von Eckhard Rebhan, München: Piper 1987.