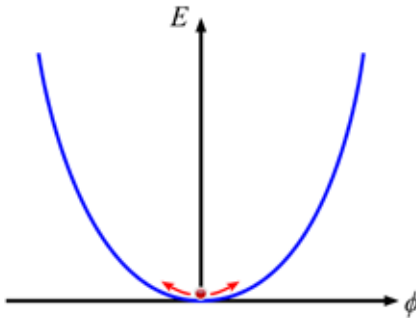


- Gaßner: Das zur Brückenbildung. Werden nun immer mehr ursprünglich freie Moleküle in diesen Strukturen gefangen, bilden sich Kondensations-tröpfchen. Unterhalb der kritischen Temperatur von 100 Grad Celsius – abhängig von den Druckverhältnissen – ist der Phasenübergang zu flüssigem Wasser vollzogen. Daran erkennt man sehr schön, dass Phasenübergänge stets mit sogenannten *Symmetriebrüchen* einhergehen. Im dampfförmigen Zustand war es den Molekülen freigestellt, sich um jede beliebige Symmetrieachse zu drehen. Gefangen in einem Verbund, sind die verbliebenen freien Drehachsen beschränkt auf die Drehungen des gesamten Verbundes. Schon haben wir einen Symmetriebruch!
- Lesch: Genau, und beim Übergang von Wasser zu Eis gehen diese freien Drehungen der einzelnen Molekülverbände in einer Gitterstruktur wieder verloren. Also ein weiterer Symmetriebruch. Bei jedem dieser Phasenübergänge wird Energie freigesetzt. Im Falle des Wassers sind es *Verdampfungs-* und *Kristallisationswärme*. Sie entsprechen jeweils der verringerten Bewegungsenergie, die das jeweils stärker gebundene System freisetzen muss.
- Gaßner: Symmetriebrüche setzen dabei sozusagen eine Entscheidung voraus, welche neue Konfiguration unter einer Vielzahl von Möglichkeiten nun tatsächlich angenommen werden soll.
- Lesch: Dabei muss ich an die Geschichte vom faulen Esel denken, der sich möglichst wenig bewegen will und deshalb fast zwischen zwei Heuballen verhungert, die exakt im gleichen Abstand links und rechts neben seinem Kopf liegen. Er möchte unbedingt den kürzesten Weg wählen – welchem Heuballen soll er sich also bei perfekter Symmetrie zuwenden?
- Gaßner: Unsere  $H_2O$ -Moleküle stecken in einem ähnlichen Dilemma: Welchem Molekülverband sollen sie sich anschließen? – Wer macht überhaupt den Anfang? Je höher die Symmetrie des Ausgangszustandes und je geringer die Veränderung der äußeren Bedingungen, umso schwieriger gestaltet sich die „Entscheidungsfindung“. Auf makroskopischer Ebene ist dies tatsächlich von Relevanz.

Kühlt man beispielsweise hochreines Wasser so vorsichtig und langsam wie nur möglich ab, bleibt es unterhalb des uns bekannten Gefrierpunkts flüssig. Der Rekord für dieses Kunststück liegt derzeit bei minus 17 Grad Celsius. Zur besseren Unterscheidung spricht man von *unterkühltem Wasser*, weil es sich sozusagen in einem falschen Zustand befindet.

- Lesch: Um unseren Esel am Leben zu erhalten: Erst ab einem bestimmten „Leidensdruck“ entscheiden sich sowohl der Esel als auch die  $H_2O$ -Moleküle, die Symmetrie zu brechen. So wird der Esel satt und das Wasser gefriert schlagartig, wobei es die Kristallisationswärme mit zeitlicher Verzögerung am Ende doch freisetzt.
- Gaßner: Auch ein Feld kann einen Phasenübergang vollziehen. Ordnet man jedem Punkt im Raum einen Wert zu, die Mathematiker sprechen von einem *Skalar*, so erhält man ein sogenanntes *Skalarfeld*. Beispielsweise könnte man in einem Konzertsaal die Lautstärke an jedem Sitzplatz messen und als Feldstärke interpretieren.
- Lesch: Skalare Felder sind regelrecht zum Lieblingswerkzeug im Theoriebaukasten der modernen Physik und Kosmologie aufgestiegen.
- Gaßner: Glücklicherweise können wir für unsere Betrachtungen im frühen Universum von einem sehr einfachen Skalarfeld ausgehen, das sich an jedem Punkt identisch verhält. Wir hätten es also mit einem idealen Konzertsaal zu tun. An jedem Sitzplatz – egal ob nahe am Konzertgraben oder weit davon entfernt – wäre die Lautstärke stets identisch. Dementsprechend wäre auch vor dem Beginn des Konzerts der Pegel der Hintergrundgeräusche überall gleich hoch – unser Feld wäre im Grundzustand. Lediglich die Gesetze der Quantenmechanik würden stets für eine kleine Schwankung sorgen. Nun betritt die spätere Hauptdarstellerin die Bühne, um sich warmzusingen. Je stärker sie sich ins Zeug legt, bezeichnen wir ihr Bemühen mit dem griechischen Buchstaben  $\phi$ , umso höher wird die Lautstärke  $E$  an jedem Sitzplatz. Der Zusammenhang muss nicht unbedingt linear sein. Auch unser menschliches Gehör nimmt doppelte Energie nicht als doppelt so laut wahr. Das Feld erweist sich gewissermaßen als störrisch gegenüber

Veränderungen seiner Feldstärke. Diese spezifische Feldeigenschaft – wenn man so will das Ausmaß seiner Sturheit – nennt man Potential. Der Potentialverlauf kann dabei beliebig kompliziert sein. Beispielsweise könnte er wie ein *harmonischer Oszillator* aussehen:

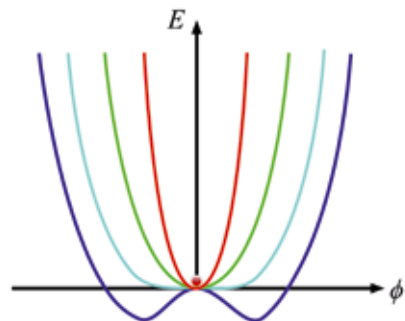


**2.17 Der harmonische Oszillator:** Dieser Potentialverlauf wird in der Physik gerne verwendet, weil sich quantenmechanische Schwankungen darin natürlicherweise unterbringen lassen. Es existiert stets eine lineare rücktreibende Kraft, d. h. ein quadratisches Potential, wodurch die Feldstärke sinusförmig um den Grundzustand schwingt.

**Lesch:** Ein schwingendes Federpendel wäre ein Beispiel für einen harmonischen Oszillator. Die rücktreibende Kraft ist stets proportional zur Auslenkung.

**Gaßner:** Aber Vorsicht – ganz wichtig! Während ein Federpendel im Raum schwingt, sprechen wir immer noch von der Sturheit oder dem Widerstand, den ein Feld *an jedem einzelnen Punkt* im Raum einer Erhöhung des Grundzustandes entgegensetzt. Es schwingt also nichts im Raum umher, sondern die Feldstärke an jedem Punkt schwingt rauf und runter. Der Zustand niedrigster Energie kennzeichnet das Vakuum.

Dieser Potentialverlauf kann nun von weiteren Faktoren abhängen, beispielsweise von der Temperatur. In einem warmen Konzertsaal könnte der Zusammenhang von stimmlichem Aufwand der Sängerin und Lautstärkepegel an den Sitzplätzen ein anderer sein (Abbildung 2.18).



**2.18 Unterschiedliche Potentialverläufe in Abhängigkeit der Temperatur (rot: heiß; blau: kalt).**

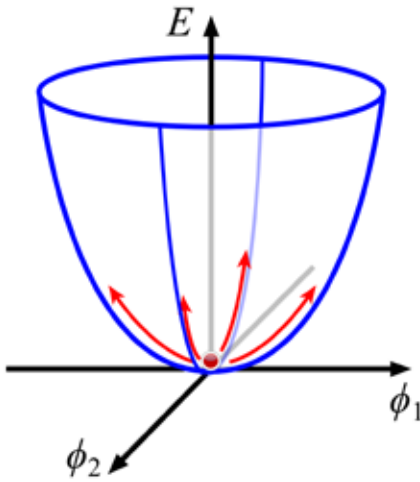
Der rote Verlauf charakterisiert das Feld für sehr hohe Temperatur. Nach entsprechender Abkühlung wird das Feld durch den grünen, flacheren Verlauf dargestellt, wobei das Vakuum als niedrigster Wert unverändert im Mittelpunkt der Funktion sitzt. Bei Erreichen einer Grenztemperatur (hellblaue Kurve) wird dieser Punkt niedrigster Energie immer mehr in die Breite gewalzt. Unterhalb dieser kritischen Temperatur bildet das Potential neue Punkte niedrigster Energie (dunkelblauer Graph). Mathematisch lässt sich dieser Verlauf einfach erreichen durch eine Funktion  $a\phi^4 + b(T - T_{\text{kritisch}})\phi^2$ . Für  $\phi$  größer 1 zieht  $\phi^4$  den Funktionsverlauf immer nach oben. Solange  $\phi^4$  und  $\phi^2$  das selbe Vorzeichen tragen sowieso, aber auch in der Konstellation  $\phi^4 - \phi^2$ . Anders sieht es aus für  $\phi$  kleiner 1, weil hier jeder Betrag dreimal mit sich selbst multipliziert kleiner wird als einmal mit sich selbst multipliziert.  $\phi^2$  kann also nahe am Grundzustand bei negativem Vorzeichen den Funktionsverlauf unter die Null-Lage ziehen. Das Vorzeichen wechselt genau bei  $T = T_{\text{kritisch}}$ .

Lesch: Josef, ich hoffe, du kriegst hier noch die Kurve! Brauchen wir das alles für das weitere Verständnis?

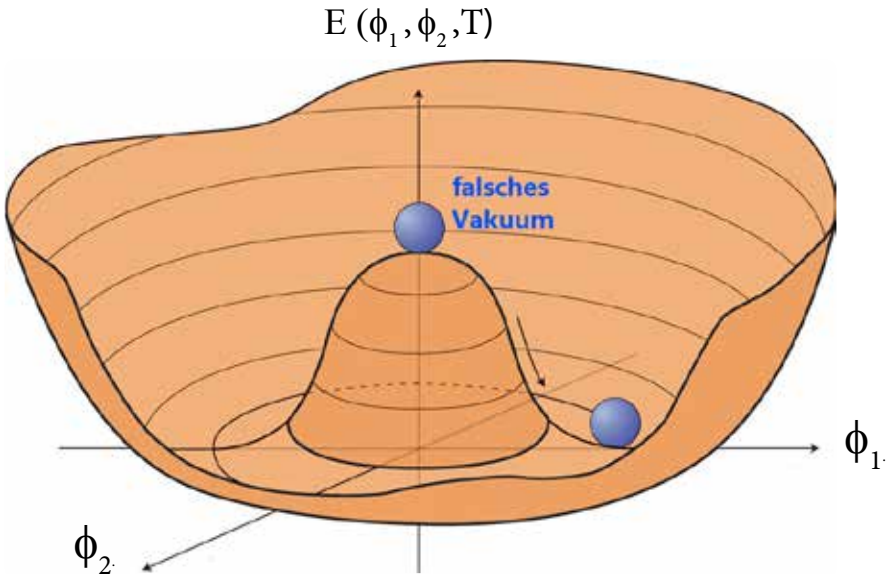
Gaßner: Nicht unbedingt. Unabdingbar ist allerdings, dass unterhalb einer kritischen Temperatur – warum auch immer – das Potential neue Punkte niedrigster Energie bildet (dunkelblaue Kurve in Abbildung 2.18). Im symmetrischen Zustand – mit der Feldstärke null im Koordinatenursprung – befindet sich das Feld also nicht mehr im Grundzustand, sondern in einem falschen, höheren Zustand. Das wäre in unserem Konzertsaal vergleichbar mit einem Offiziellen, der die Bühne betritt um etwas anzukündigen. Er räuspert sich kurz und plötzlich verringern sich die Hintergrundgeräusche und es wird deutlich leiser.

Lesch: Dieser neue niedrigere Lautstärkepegel ist der neue Grundzustand?

Gaßner: Ja. Damit sind wir fast am Ziel. Es gilt lediglich noch zu berücksichtigen, dass mehrere Parameter den Potentialverlauf beeinflussen können. Wenn sich beispielsweise zwei Sänger  $\phi_1$  und  $\phi_2$  auf der Bühne warm-singen, hätte der Funktionsverlauf von Abbildung 2.17 wie in Abbildung 2.19 aussehen können:



2.19 Potentialverlauf für zwei Veränderliche  $\phi_1$  und  $\phi_2$ .



2.20 Der sogenannte Mexican Hat: Das Feldpotential  $E(\phi_1, \phi_2, T)$  bildet unterhalb einer kritischen Temperatur eine Rinne mit neuen Punkten niedrigster Energie. Der symmetrische, bisherige Grundzustand befindet sich gegenüber den neuen Grundzuständen in einem falschen, höheren Zustand, dem falschen Vakuum.

Gaßner: Die dunkelblaue Kurve aus Abbildung 2.18 wird dann ebenfalls dreidimensional und sieht aus wie ein Sombrero (Abbildung 2.20). Weinkenner mögen sich auch an den Boden einer teuren Flasche erinnert fühlen. Beim Übergang vom bisherigen – nunmehr falschen Grundzustand – zum neuen Grundzustand gibt es ein Problem, das man in der Graphik schön erkennt: In der Rinne stehen beliebig viele gleichberechtigte Punkte für den neuen Grundzustand zur Auswahl. Das System muß eine folgenschwere Entscheidung treffen, welchen Zustand es auswählt: Es muss einen spontanen Symmetriebruch begehen.

Lesch: Hier kommt wieder unser Esel ins Spiel.

Gaßner: Genau so stellen wir uns die Entwicklung des Vakuums im frühen Universum vor. Das Vakuum wird in Abbildung 2.20 symbolisiert durch die blaue Kugel, die für einen kurzen Zeitraum im symmetrischen, falschen Zustand verharrt. Es bedarf einer Entscheidung, in welche Raumrichtung die Symmetrie gebrochen wird beziehungsweise die Kugel nach unten in einen der richtigen, niedrigsten Energiezustände rollt. Für die Dauer dieser Entscheidungsfindung, oder genauer gesagt bis zum endgültigen Erreichen des niedrigsten Niveaus, besitzt das falsche Vakuum gegenüber dem wahren Vakuum eine positive Energie und das an jedem Punkt im Raum!

Lesch: Schön und gut, aber der temperaturabhängige Potentialverlauf mit exakt diesen Eigenschaften wirkt auf mich schon äußerst willkürlich konstruiert.

Gaßner: Wohl wahr – die Antwort darauf wird uns ein Schimpanse geben.

Lesch: Ein was?

Gaßner: Dazu kommen wir gleich, ich möchte nur vorab nochmals kurz zusammenfassen, weil wir doch mittlerweile viele Begriffe eingeführt haben.

Lesch: Gut, gönnen wir uns eine geistige Verschnaufpause.