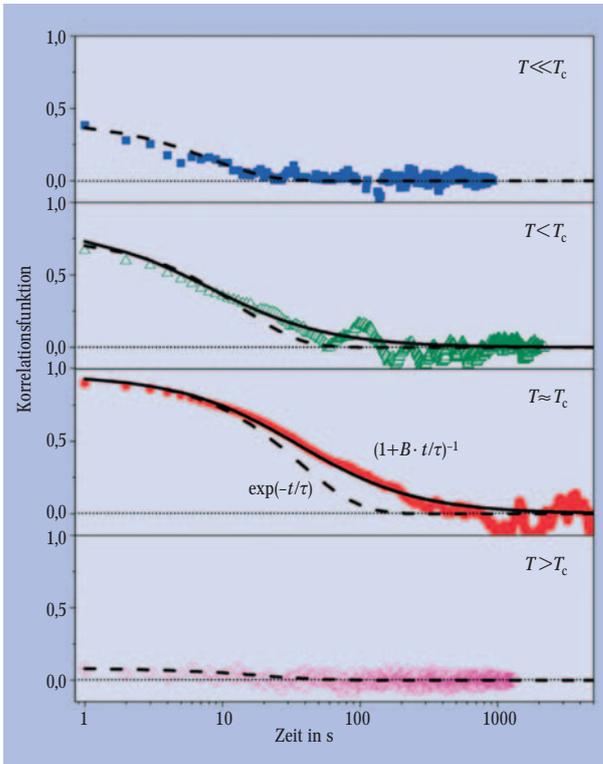


## Röntgenstrahlen beleuchten Phasenübergang

**Mittels Röntgenstrahlen lässt sich die kritische Dynamik eines Phasenübergangs in einer Metall-Legierung quantitativ untersuchen.**

Metallische Legierungen gehören zu den Werkstoffen, die bereits in vorgeschichtlicher Zeit verwendet wurden. In der Zeit von ca. 2500 bis



**Abb. 1** Gemessene zeitabhängige Korrelationsfunktionen von Fe<sub>3</sub>Al im Bereich um die kritische Temperatur herum (vgl. Text) [1].

800 v. Chr. war Bronze das wichtigste Rohmaterial, mit dem neben Gebrauchsgegenständen, Werkzeugen und Waffen auch Kultgegenstände und Schmuck hergestellt wurden – daher die Bezeichnung Bronzezeit. Bronze bezeichnet im Allgemeinen die Legierungen von Kupfer mit anderen Metallen. Die in der Bronzezeit verwendete Mischung bestand zu etwa 70 bis 90 % aus Kupfer und zum Rest vor allem aus Zinn.<sup>1)</sup>

Heutzutage kommt eine Vielzahl metallischer Legierungen bei technologischen Anwendungen zum Einsatz, was u. a. mit der Möglichkeit zusammenhängt, die Materialeigenschaften gezielt zu verändern, indem man die chemische Zusammensetzung sowie andere thermodynamische Parameter ändert. Darüber hinaus sind sie auch ideale Modellsysteme für das Studium von Phasenübergängen. Metallische Mischungen zeigen eine Vielzahl von fluiden, kristallinen

und magnetischen Phasen, insbesondere treten kontinuierliche Phasenübergänge (Phasenübergänge 2. Ordnung) auf.

Dazu zählen Ordnungs-Unordnungs-Übergänge, die in binären metallischen AB-Legierungen vorkommen. Diese weisen oft kristalline Strukturen auf, bei denen die beiden Komponenten nicht in ungeordneter Weise auf den Gitterplätzen verteilt sind, sondern eine geordnete Überstruktur ausbilden. Wird eine solche geordnete Legierung aufgeheizt, so können diese Überstrukturen verschwinden, was als Ordnungs-Unordnungs-Übergang bezeichnet wird. Ein System, in dem solche Phasenübergänge sowohl experimentell als auch mittels Simulationen extensiv untersucht worden sind, ist Fe<sub>3</sub>Al [1]. In diesem System sitzen die Atome auf einem BCC-Gitter, auf dem sich eine Reihe von geordneten und ungeordneten Phasen ausbilden. Eine davon ist die ungeordnete A2-Phase, in der Fe und Al zufällig über die Plätze des BCC-Gitters verteilt sind, während in der geordneten B2-Phase die BCC-Struktur in zwei kubische Untergitter aufgespalten wird, von denen eines bevorzugt mit Fe und das andere bevorzugt mit Al besetzt ist. Der B2-A2-Übergang in Fe<sub>3</sub>Al ist von 2. Ordnung (mit einer kritischen Temperatur von etwa 1000 K).

Kritische Phänomene sind eines der faszinierendsten Gebiete der statistischen Physik. Am kritischen Punkt treten Fluktuationen auf allen Längen- und Zeitskalen auf, was sich in der Divergenz statischer und dynamischer Größen in Form von Potenzgesetzen äußert. Oberhalb des kritischen Punktes werden die Korrelationen zwischen verschiedenen Atomen (oder in magnetischen Systemen zwischen Spins), die von den größten Fluktuationen im System hervorgerufen werden, durch eine Korrelationslänge gemessen, die am kritischen Punkt unendlich wird. In Bezug auf Transportprozesse bedeutet das Anwachsen der Korrelationslänge eine starke Verlangsamung (*critical slowing down*): Transportprozesse, die weit oberhalb des kritischen Punktes auf einer Piko-sekundenskala ablaufen, können sich in der Nähe des kritischen Punktes auf makroskopischen Zeitskalen abspielen. Für die Dynamik in der Nähe von kritischen Punkten gibt es umfangreiche theoretische Vorhersagen [2]. So zerfallen oft

zeitliche Korrelationsfunktionen weit oberhalb des kritischen Punktes exponentiell, während sie in der Nähe des kritischen Punktes einem Potenzgesetz mit universellem Exponenten genügen. Die Bestimmung solcher Exponenten erfordert sehr präzise Messungen und fordert die beständige Weiterentwicklung experimenteller Techniken heraus.

Im System Fe<sub>3</sub>Al wurden kritische, dynamische Fluktuationen bereits vor zehn Jahren mittels Röntgenstrahlung untersucht [3]. Wird die Probe mit einem kohärenten Röntgenstrahl sehr hoher Intensität bestrahlt, so wird für die Verteilung der Streuintensitäten im Raum ein charakteristisches fleckiges Beugungsmuster (Speckle-Muster) beobachtet, das die momentane Unordnung im System widerspiegelt. Aus den zeitlichen Intensitätsfluktuationen der Speckles kann dann eine dynamische Korrelationsfunktion extrahiert werden. Das Problem der Methode ist, dass der Fluss an kohärenten Strahlen selbst an Quellen wie der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle ESRF in Grenoble sehr begrenzt ist. Von daher reichte die erzielte Statistik nicht aus, um Skalenvorhersagen zur kritischen Dynamik quantitativ zu testen.

Eine Gruppe von Forschern vom MPI für Metallforschung in Stuttgart und vom ESRF hat hier nun durch eine andere Vorgehensweise wesentliche Fortschritte erzielt [4]. Untersucht wurde der oben beschriebene B2-A2-Übergang in Fe<sub>3</sub>Al. Die Idee des Experiments ist, einen Röntgenstrahl auf ein sehr kleines Volumen  $\delta V$  der Probe zu fokussieren (mit einem Strahldurchmesser im  $\mu\text{m}$ -Bereich). Wichtig ist hierbei die Präparation einer sehr dünnen Probe, um das Beobachtungsvolumen  $\delta V$  im  $\mu\text{m}^3$ -Bereich zu halten.<sup>2)</sup> Aufgrund des kleinen Volumens ist die Anzahl der temporären Dichtefluktuationen, die der Röntgenstrahl „sieht“, so klein, dass sie in Form von Fluktuationen der gestreuten Strahlintensität sichtbar werden. Die Voraussetzung dafür, dass dieses Experiment funktioniert, ist natürlich, dass die typischen Fluktuationen im System tatsächlich auf einer Längenskala auftreten, die nicht viel kleiner als die lineare Abmessung des Volumens  $\delta V$  sind. Bei den untersuchten Fluktuationen am kritischen Punkt des B2-A2-Übergangs in Fe<sub>3</sub>Al ist diese Bedingung aber erfüllt.

Die Abbildung zeigt das Verhalten

1) Im Vergleich zu dem später verwendeten Eisen hat sie einen wesentlich niedrigeren Schmelzpunkt bei etwa 1000 K und konnte so mit relativ einfachen Mitteln in die gewünschte Form gegossen werden.

2) Für die technischen Einzelheiten vgl. [4]

der gemessenen zeitlichen Korrelationsfunktionen  $C(t)$  bei Annäherung an die kritische Temperatur  $T_c$ . Während  $C(t)$  weit unterhalb von  $T_c$  exponentiell zerfällt (die gestrichelten Kurven in der Abb. sind Fits mit Exponentialfunktionen), genügt die Korrelationsfunktion in der Nähe von  $T_c$  dem erwarteten Potenzgesetz (durchgezogene Linie). Damit wurde durch das vorliegende Experiment der Übergang von nichtkritischer zu kritischer Dynamik in einer binären metallischen Legierung gezeigt.

Das Experiment von Mocuta *et al.* weist den Weg, wie mit Röntgenstrahlen wichtige Einsichten in die Dynamik von Phasenübergängen gewonnen werden können. In Zukunft wären hier neben der systematischen Untersuchung der kritischen Dynamik auch Experimente zur Phasenordnungskinetik denkbar.

JÜRGEN HORBACH

- [1] K. Binder, Statistical Theories of Phase Transitions, in: P. Haasen (Hrsg.), Materials Science and Technology, Vol. 5, VCH, Weinheim (1992)
- [2] P. C. Hohenberg und B. I. Halperin, Rev. Mod. Phys. **49**, 435 (1977)
- [3] S. Brauer *et al.*, Phys. Rev. Lett. **74**, 2010 (1995)
- [4] C. Mocuta, H. Reichert, K. Mecke, H. Dosch und M. Drakopoulos, Science **308**, 1287 (2005)

## Atomuhr im optischen Gitter

**Eine neue Atomuhr, in der eine Atomwolke in ein optisches Gitter gesperrt wird, könnte eine 1000-mal präzisere Zeitmessung ermöglichen.**

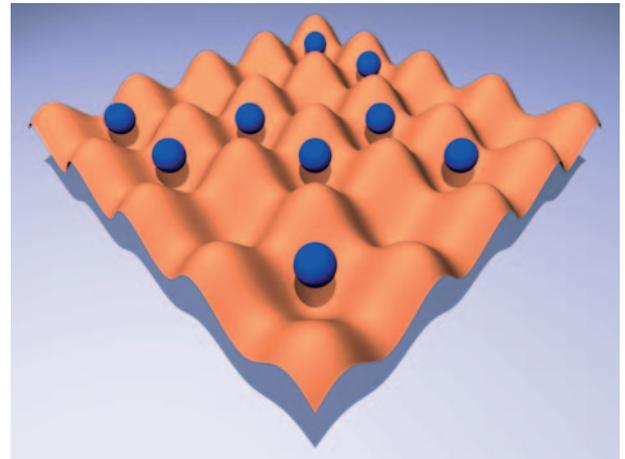
Jeder Uhr liegt ein periodischer Vorgang zugrunde, der möglichst gleichmäßig abläuft. Ein Zählwerk führt über die Anzahl der Perioden Buch und repräsentiert somit die vergangene Zeit seit seiner Initialisierung. Die Geschichte der Uhrentwicklung hat verschiedene auf diesem Prinzip basierende Uhren hervor gebracht, wie die 1656 von Christiaan Huygens erfundene Pendeluhr. Bei dieser übersetzt das Uhrwerk die Anzahl der registrierten Pendelschwingungen in eine bestimmte Zeigerstellung auf dem Ziffernblatt. Die in den 1920er-Jahren entwickelte Quarzuhr verwendete erstmals einen elektronischen Zähler. Der zur Schwingung angeregte Quarz vibriert in modernen Quarzuhren 32 786-mal in der Sekunde, damit sich der binäre Zähler beim Stand

von  $2^{15}$  selbst zurücksetzt und den Sekundenzeiger um eine Einheit weiter bewegt. Der heutige Stand der Technik sind hochentwickelte Cäsium-Atomuhren, die einen Hyperfein-Übergang des  $^{133}\text{Cs}$ -Atoms nutzen. Diese Hyperfein-Aufspaltung, die auf der Wechselwirkung des Kerns mit dem Magnetfeld seiner Elektronen beruht, wird mit einem von Norman Ramsey [1] entwickelten Verfahren möglichst genau detektiert. Die Übergangsfrequenz wurde 1967 bei der Neudefinition der SI-Sekunde auf exakt 9 192 631 770 Zyklen pro Sekunde festgelegt.<sup>1)</sup> Moderne Cs-Fontänen-uhren erreichen eine relative Unsicherheit von weniger als  $10^{-15}$ .

Da sich die Zeit wesentlich genauer als alle anderen physikalischen Größen bestimmen lässt, bilden Atomuhren die Grundlage für alle hochpräzisen Messungen. Zur Charakterisierung einer Uhr sind zwei Größen entscheidend. Einerseits gibt die Stabilität einer Uhr an, wie stark die Frequenz des Oszillators schwankt, andererseits gibt die Genauigkeit Auskunft, wie gut die gemittelte Frequenz mit dem wahren Wert des Uhrenübergangs, z. B. zwischen den beiden Cs-Hyperfeinniveaus, übereinstimmt. Die Stabilität einer Uhr gibt also die statistische Unsicherheit an, und die Genauigkeit misst den Einfluss äußerer Störungen, die die Übergangsfrequenz systematisch verschieben können.

Eine höhere Oszillatorfrequenz ist für eine gute Uhr ein entscheidender Vorteil. Anschaulich ermöglicht es eine höhere Frequenz, die Zeit in feinere Teile zu zerlegen, ähnlich wie es ein Maßstab mit einer feineren Unterteilung erlaubt, kürzere Abstände zu messen. Eine höhere Frequenz steigert die Stabilität und ge-

stattet es, bereits nach kürzerer Zeit einen genaueren Wert der mittleren Oszillatorfrequenz anzugeben.<sup>2)</sup> Damit ist die Strategie zur Verbesserung der Uhren klar: Ein Oszillator mit noch höherer Frequenz muss her. Seit Ende der 1960er-Jahre



In den „Bäuchen“ eines optischen Gitters befinden sich Strontium-Atome (blau), deren Uhrenübergang mit einem Laser abgefragt wird. Während die bisherigen Experimente nur mit einem eindimensionalen optischen Gitter arbeiten [1], soll sich die Genauigkeit der Atomuhr mit dem hier dargestellten dreidimensionalen Gitter weiter steigern lassen.

denkt man ernsthaft über optische Oszillatoren nach, d. h. einen Uhrenübergang, der mit Laserlicht von einigen 100 oder 1000 THz getrieben wird. Als Oszillator kommen eine ganze Reihe von Atomen, Molekülen oder Ionen in Frage. Das Uhrwerk einer optischen Uhr, also ein sehr schneller Zähler für sichtbares Licht, war jedoch lange Zeit eine große Hürde. Die Zähler füllten ganze Hallen mit Lasern und funktionierten nur sporadisch. In der Tat gelang es erst 1995, den ersten Zähler für sichtbares Licht zu realisieren [2]. Diese Situation hat sich 1999 mit der Einführung von Frequenzkämmen als optische Zähler geändert [3]. Mit dieser Technologie lassen sich

1) Die Festlegung auf diese krumme Zahl war notwendig, um mit der alten Ephemeridensekunde kompatibel zu sein.

2) Dies kann ein entscheidender Vorteil sein: Würde man etwa die Zeit mit Hilfe einer Sonnenuhr bestimmen, die sich auf eine Minute genau ablesen lässt, so müsste man rund 2 Millionen Jahre warten, um eine relative Genauigkeit von  $10^{-12}$  zu erreichen. Dies ist übrigens ein Wert, den die Stabilität der Erdrotation durchaus erlauben würde.

## KURZGEFASST...

### ■ Totgesagte leben länger

Ein Astronomenteam hat entdeckt, dass der erloschene Stern im Zentrum des Supernova-Restes von Cassiopeia A doch noch aktiv ist. Mit dem Weltraumteleskop Spitzer beobachteten sie nicht nur das „Infrarotecho“ des Supernova-Ausbruchs von 1680, sondern auch das eines erst 1953 erfolgten Ausbruchs. Vermutlich handelt es sich daher bei Cassiopeia A um einen der ansonsten schwer zu findenden Magnetare, das sind Neutronensterne mit starkem Magnetfeld. Damit wäre erstmals ein Magnetar gefunden, von dem bekannt ist, wann und aus was für einem Stern er entstanden ist. O. Krause *et al.*, Science **308**, 1513 (2005)

### ■ Sauerstoff unter Druck

Bei Normaldruck ist Sauerstoff ein antiferromagnetischer Isolator, wandelt sich aber unter dem extremen Druck von ca. 96 Gigapascal zu einem Supraleiter und Metall. Seit Jahren vermutet man, dass Sauerstoff bereits bei wesentlich geringerem Druck seine magnetischen Eigenschaften verliert. Das konnte nun Igor Goncharenko (Laboratoire Léon Brillouin, Saclay nahe Paris) mit Hilfe von Neutronenstreuung an einer polykristallinen Probe festen Sauerstoff nachweisen. Damit zeigte er, dass die langreichweitige magnetische Ordnung in Sauerstoff bereits bei etwa 8 Gigapascal verschwindet. I. Goncharenko *et al.*, Phys. Rev. Lett **94**, 205701 (2005)

Dr. Jürgen Horbach, Institut für Physik, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Staudinger Weg 7, 55099 Mainz