

Orientierungsordnung in Flüssigkeiten

Flüssiges Blei hat eine fünfzählige Symmetrie – ganz anders als Bleikristalle

Harald Reichert

Symmetrien sind ein wichtiger Schlüssel, mit dem die Physik die Geheimnisse der Natur enträtselt und ordnet. Auch die Eigenschaften von kristalliner Materie hängen von inneren Symmetrien ab, die heute im Detail verstanden sind. Die mikroskopische Struktur sowie die lokale Punktsymmetrie in der Nahordnung von stark ungeordneten Systemen gehören dagegen zu den fundamentalen offenen Fragen auf dem Gebiet der kondensierten Materie. Die Vermutung, dass einfache Flüssigkeiten Fragmente mit polytetraedrischer (nichtkristalliner) Symmetrie aufweisen, hat schon früh die Bedeutung lokaler Symmetrien herausgestellt. Diese zufällig orientierten, hochmobilen Strukturen waren bislang experimentell nicht direkt zugänglich, da herkömmliche Streuexperimente zur Strukturbestimmung aufgrund intrinsischer Mittelungsprozesse in der Streuung es nur erlauben, die isotrope radiale Verteilungsfunktion zu bestimmen. Kürzlich gelang es nun erstmals, mit Synchrotronstrahlung eine lokale fünfzählige Symmetrie in flüssigem Blei direkt nachzuweisen. Die Beobachtung einer lokalen fünfzähligen Symmetrie in einfachen Flüssigkeiten wie Blei hat tiefgehende Bedeutung für das Verständnis der Stabilität kondensierter Materie. Die Experimente zeigen direkt, dass Kristalle und Flüssigkeiten strukturell nicht miteinander verwandt sind.

Kristalline Materialien sind durch die Anordnung von Atomen oder Molekülen auf einem Raumgitter mit Translationssymmetrie und lokaler Punktsymmetrie definiert. Dabei ist die lokale Punktsymmetrie oder Orientierungsordnung in kristallinen Gittern stets an die translatorische Ordnung des Systems gekoppelt. Eigenschaften des kristallinen Festkörpers müssen dann mit den entsprechenden Symmetrien des Gitters verträglich sein. Unser heutiges Modell des Festkörpers beruht in der Tat wesentlich auf einem Verständnis der fundamentalen Struktureinheiten in periodischen Gittern. So spiegeln etwa elastische Eigenschaften wie die Gitterschwingungen der Atome um ihre Gleichgewichtslage (Phononen) oder die elektronische Struktur von Metallen (Fermi-Oberflächen) die Symmetrie des zugehörigen Gitters wieder. Ungeordnete Systeme wie Flüssigkeiten, Gläser und amorphe Sys-

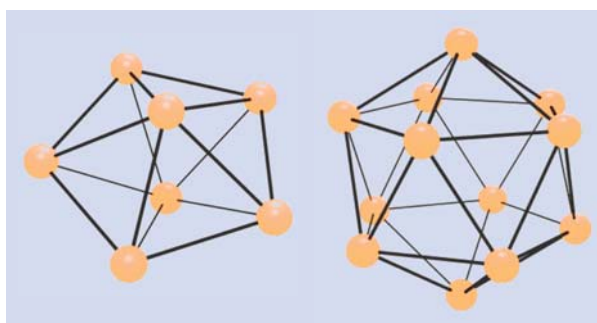


Abb. 1: Lokale Strukturen mit fünfzähliger Symmetrie: pentagonale Bipyramide (rechts) und Ikosaeder (links).

teme sind dagegen durch einen Verlust an langreichweitiger Ordnung gekennzeichnet. In diesen Systemen erreicht die Packungsdichte beinahe die Packungsdichte von periodischen Gittern, jedoch ohne das ordnende Konzept der Translationssymmetrie. Die Komplexität der Struktur von ungeordneten Systemen hat gerade darin ihren Ursprung [1], wobei der Grad an Unordnung im System im Allgemeinen von den Wechselwirkungen der Atome oder Moleküle abhängen wird.

Wechselwirkungspotentiale mit einem attraktiven und einem repulsiven Teil werden bei endlichen Temperaturen stets zu einem gewissen Grad an Nahordnung führen. Weiter stellt sich sofort die Frage, ob und gegebenenfalls wie der Grad an Orientierungsordnung an den Verlust der Translationsordnung gekoppelt ist [2]. Da makroskopische Körper aus zu vielen Einzelteilchen bestehen, um die Struktur durch die Angabe der räumlichen Koordinaten $r_i = (x_i, y_i, z_i)$ $i = 1, \dots, N$ zu beschreiben, lassen sich im Rahmen der statistischen Physik nur die Verteilungen von Abständen und Orientierungen im System angeben. Dazu werden die Koordinaten (x_i, y_i, z_i) in die Koordinaten (r, θ, ϕ) übergeführt. Die Definition der Abstandsverteilung unterscheidet sich von der Beschreibung der Orientierungsverteilung in grundlegender Weise. Abstandsverteilungen werden aus den Abständen von Teilchenpaaren gewonnen, während für die Angabe von Orientierungsverteilungen lokal mindestens drei oder mehr Teilchen benötigt werden. Damit führt die Beschreibung der Orientierungsordnung automatisch auf Mehrkörperkorrelationen, die sowohl theoretisch als auch experimentell ungleich schwieriger zu behandeln sind. Zur Beschreibung der Struktur ungeordneter Systeme muss daher zunächst das theoretische und experimentelle Rüstzeug entwickelt werden.

Bereits vor einigen Jahrzehnten wurde aus der Be-

Dr. Harald Reichert, Max-Planck-Institut für Metallforschung, Heisenbergstr. 1, 70569 Stuttgart – Festvortrag anlässlich der Verleihung des Walter-Schottky-Preises 2002 auf der Physikertagung in Leipzig

obachtung der Unterkühlbarkeit von Flüssigkeiten geschlossen, dass die lokale Struktur von Flüssigkeiten mit der Struktur des entsprechenden Festkörpers inkompatibel ist [3]. Lokale Strukturen wie etwa Cluster aus wenigen Atomen auf der Basis kristalliner Symmetrien (2, 3, 4, 6-fache Symmetrie) sollten demnach in der Flüssigkeit nur eine untergeordnete Rolle spielen, da sie andernfalls als Nukleationskeime für den kristallinen Festkörper beim Abkühlen unter den Schmelzpunkt dienen könnten. In der Tat haben Experimente

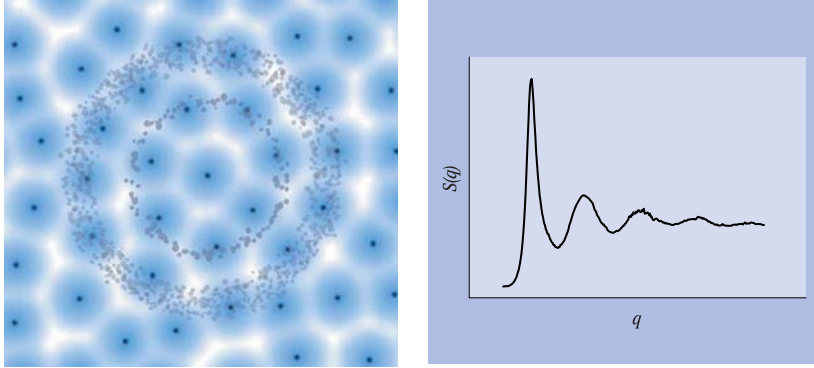


Abb. 2:
 ► a) Momentaufnahme einer einfachen Volumenflüssigkeit im Realraum. Die Position der Flüssigkeitsatome ist im Schwerpunkt gekennzeichnet. Die Verteilung der Punkte in Ringen um das ruhende Atom im Zentrum gibt die Lage

der Nachbaratome zu verschiedenen Zeiten wieder. Im zeitlichen Mittel ergibt sich daraus die isotrope Abstandsverteilung $g(r)$.
 ► b) Im Streuexperiment zugänglich ist der isotrope Strukturfaktor $S(q)$.

mit identischen Stahlkugeln als Modell einer einfachen Hartkugelflüssigkeit in einer elastischen Haut gezeigt [4], dass die dominierenden Symmetrieelemente in ungeordneten Kugelpackungen 5-fache Symmetrien in Fragmenten einer ikosaedrischen Nahordnung sind (siehe Abb. 1). Unter einfachen Flüssigkeiten verstehen wir hier einatomare Systeme, die sich mit radialsymmetrischen Wechselwirkungen beschreiben lassen.

Analytisch fassbar und in Simulationen mit Modellflüssigkeiten erstmals bestimmbar wurden Mehrkörperkorrelationen durch die explizite Angabe von Orientierungsordnungsparametern [5, 1]. Diese quantifizieren die Symmetrieelemente in der lokalen Umgebung eines Atoms durch die Analyse der Orientierung der Bindungen zu den Nachbaratomen. Auf diese Weise lässt sich – zumindest in Computersimulationen – der Grad an Orientierungsordnung eindeutig bestimmen. Molekulardynamiksimulationen an Flüssigkeiten mit Lennard-Jones-Wechselwirkungen haben so im unterkühlten Zustand ein starkes Anwachsen nichtkristalliner, fünfzähliger Symmetrien gezeigt.

Fest-flüssig-Grenzflächen

Strukturuntersuchungen auf atomarer Längenskala an makroskopischen Materialmengen basieren auf Streuexperimenten, wobei die Wellenlänge der verwendeten Sonden wie Röntgenstrahlen, Elektronen und Neutronen von der Dimension der atomaren Abstände ist. Im Experiment wird dann der Strukturfaktor $S(q)$ als Funktion des vektoriellen Impulsübertrages q bestimmt. Konventionelle Streuexperimente schließen bis heute eine räumliche und zeitliche Mittelung über die lokalen Strukturen des untersuchten Systems ein. Für Strukturuntersuchungen an quasistatischen Strukturen wie Gläsern und amorphen Festkörpern kommt in erster Linie die räumliche Mittelung zum Tragen, während bei dynamischen Systemen wie Flüssigkeiten zusätzlich

die zeitliche Mittelung über viele Konfigurationen eingeschlossen ist. Beide Arten der Mittelung führen zu einem nahezu vollständigen Verlust an direkter Information über den Grad der Orientierungsordnung. Experimentell bestimmbar bleibt die Paarkorrelationsfunktion $g(r)$, die die Verteilung und Korrelation der Abstände zwischen Paaren von Atomen oder Molekülen festlegt und ihren Ausdruck im isotropen Strukturfaktor

$$S(q) = 1 + \rho_0 \int [g(r) - 1] e^{iqr} dr$$

findet (Abb. 2), wobei ρ_0 die mittlere Dichte bezeichnet. Quantitativ kann also die Paarkorrelationsfunktion $g(r)$ aus der Fourier-Transformierten des Struktur factors $S(q)$ bestimmt werden. Leider sind damit Mehrkörperkorrelationen in Volumensystemen experimentell nicht direkt zugänglich.

Ein Weg, die beschriebenen Schwierigkeiten bei der Bestimmung von Orientierungskorrelationen in ungeordneten Volumensystemen zu überwinden, besteht in der Einführung von Symmetriebrüchen an Grenzflächen. Ein wohlbekanntes Beispiel für den Bruch der Translationssymmetrie stellt die freie Oberfläche dar. So wurde die Struktur von einfachen metallischen Flüssigkeiten sowohl parallel als auch senkrecht zur Oberfläche der Flüssigkeiten eingehend untersucht [6]. Senkrecht zur Oberfläche – in Richtung des Symmetriebruchs – findet man dabei im einfachsten Fall ein oszillatorisches Verhalten der mittleren Dichte um den konstanten Volumenwert [4]. Bestimmt man den Strukturfaktor $S(q)$ der Flüssigkeit parallel zur Oberfläche, so stellt man keinerlei Änderungen im Vergleich zur Volumenstruktur fest [8]. Orientierungskorrelationen lassen sich also durch einen einfachen Bruch der Translationssymmetrie an freien Oberflächen nicht erfassen. Dies gilt natürlich ebenso für Flüssigkeiten in Kontakt mit glatten, nichtkristallinen Wänden [9]. Erst eine weitere Erniedrigung der Symmetrie parallel zur Grenzfläche durch direkten Kontakt der Flüssigkeit mit einem periodisch strukturierten Wandpotential erlaubt es, die in der Flüssigkeit vorhandenen lokalen Struktu-

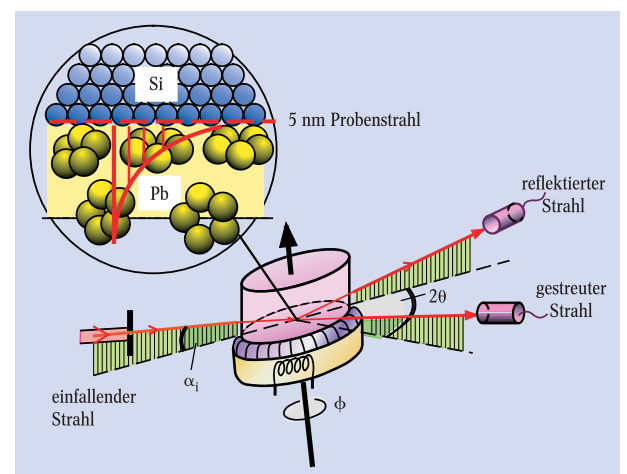


Abb. 3:
 Schematische Darstellung des Experiments. Der Siliziumkristall (oben) wird in Kontakt mit Blei (unten) gebracht, das mittels einer Heizwendel verflüssigt wird ($T_M = 326^\circ \text{K}$). Der unterhalb des kritischen Winkels einfallende Strahl wird an der fest-flüssig-Grenzfläche totalreflektiert. Die in die Flüssigkeit eindringende, exponentiell gedämpfte Welle wird an den lokalen Strukturen gestreut. Parallel zur Grenzfläche lässt sich dann der Strukturfaktor $S(q_{\parallel})$ bestimmen.

ren an der Wand auszurichten, sodass die räumliche und zeitliche Mittelung im Streuexperiment die Beobachtung von Orientierungskorrelationen nicht mehr verhindert. Hier ist zu beachten, dass das strukturierte Wandpotential in der Flüssigkeit vorhandene Orientierungskorrelationen nicht nur ausrichten, sondern auch direkt verändern kann. Der Grad der Veränderung hängt dann von der Stärke der Wechselwirkung zwischen Flüssigkeit und Substrat ab. Die Ausrichtung der lokalen Strukturen in der Flüssigkeit ist auf eine dünne Schicht an der Grenzfläche beschränkt, deren Dicke durch die Reichweite des Orientierungspotentials bestimmt ist. Da typische Reichweiten bestenfalls in der Größenordnung von einigen Atomdurchmessern liegen, werden für die Untersuchung derartiger Korrelationen besondere Methoden benötigt. Teststrahlen mit derart kleiner Ausdehnung stehen normalerweise nicht zur Verfügung. Wir haben daher eine Messanordnung entwickelt, die es erlaubt, die wandnahe Flüssigkeitsstruktur direkt zu isolieren [10].

Die zu untersuchenden, grenzflächennahen Strukturen sind in der Regel tief vergraben, da für die in Frage kommenden Kombinationen von Flüssigkeit und Festkörper die Flüssigkeit den Festkörper nicht benetzt und damit keine geschlossenen, dünnen Flüssigkeitsfilme auf dem kristallinen Substrat erzeugt werden können. Die Dicke der Flüssigkeitsschicht muss dann makroskopische Dimensionen von einigen Millimetern erreichen. Um die vergrabene Grenzfläche selbst zu erreichen, verwenden wir daher Röntgenstrahlung sehr hoher Energie und Kollimation ($E = 71,5 \text{ keV}$). Strahlung mit diesen Eigenschaften und ausreichend hoher Intensität steht heute an modernen Synchrotronstrahlungsquellen wie dem Hamburger Synchrotronstrahlungslabor HASYLAB oder der europäischen Synchrotronstrahlungsquelle (ESRF) in Grenoble zur Verfügung. Damit lässt sich beispielsweise ein Silizium-Einkristall von 20 mm Dicke problemlos durchdringen.

Um nun die Streusignale einer dünnen Flüssigkeitsschicht unmittelbar an der Grenzfläche aus dem um viele Größenordnungen intensiveren Untergrund von Volumenstreusignalen zu isolieren, ist es unerlässlich, den Röntgenstrahl vertikal zur Grenzfläche auf wenige Nanometer einzuschränken. Herkömmliche Techniken zur Fokussierung und Kollimierung von Röntgenstrahlung werden zunächst benutzt, um einen Röntgenstrahl zu erzeugen, dessen vertikale Ausdehnung nur noch einige μm beträgt. Der Strahl wird dann in einem Winkel, der unterhalb des kritischen Winkels für Totalreflexion α_c liegt, von der Festkörperseite her auf die Grenzfläche gerichtet (Abb. 3). Die einfallende Röntgenwelle kann dann nur noch in eine dünne Schicht der Flüssigkeit eindringen, da der stark anwachsende imaginäre Teil des Impulses für eine starke exponentielle Dämpfung in der optisch dünneren Flüssigkeit sorgt. Es gelingt mit diesem optischen Trick, einen „Teststrahl“, dessen Ausbreitungsrichtung parallel zur Grenzfläche liegt, auf der flüssigen Seite der Grenzfläche in einer Schicht von nur wenigen Nanometern zu implantieren [11]. Der Teststrahl wird analog zum Streuvorgang in Volumenflüssigkeiten an den Dichtehomogenitäten der flüssigen Grenzschicht gestreut. Eine Analyse der Streusignale parallel zur Grenzfläche erlaubt es dann, die in der flüssigen Grenzschicht vorhandenen Korrelationen sowie die Abstandsverteilung $g(\vec{r}_{\parallel})$ aus dem Strukturfaktor $S(\vec{q}_{\parallel})$ zu rekonstruieren. Durch eine Analyse der unter symmetrischen Bedin-

gungen reflektierten Intensität senkrecht zur Grenzfläche lässt sich zudem das Dichteprofil der Flüssigkeit an der Wand bestimmen. Dies wurde erstmals für flüssiges Gallium an perfekt präparierten Diamantoberflächen gezeigt. Auch hier findet man ein oszillatorisches Verhalten um den Volumenwert der Dichte [12], wobei sich allerdings die Periode der Oszillationen an der Grenzfläche und der freien Oberfläche unterscheiden [7].

Wir haben für unsere Untersuchungen der grenzflächennahen Strukturen von Flüssigkeiten in Kontakt mit atomar strukturierten Festkörperwänden flüssiges Blei auf einkristallinen Silizium-(100)-Oberflächen verwendet. Durch Beschränkung eines $8 \mu\text{m}$ hohen Röntgenstrahles ($E = 71,5 \text{ keV}$) auf Ein- und Ausfallswinkel $\alpha_{i,f} \leq \alpha_c$ mit $\alpha_c = 0,04^\circ$ lässt sich die Streutiefe auf der flüssigen Seite der Grenzfläche auf 5 nm reduzieren.

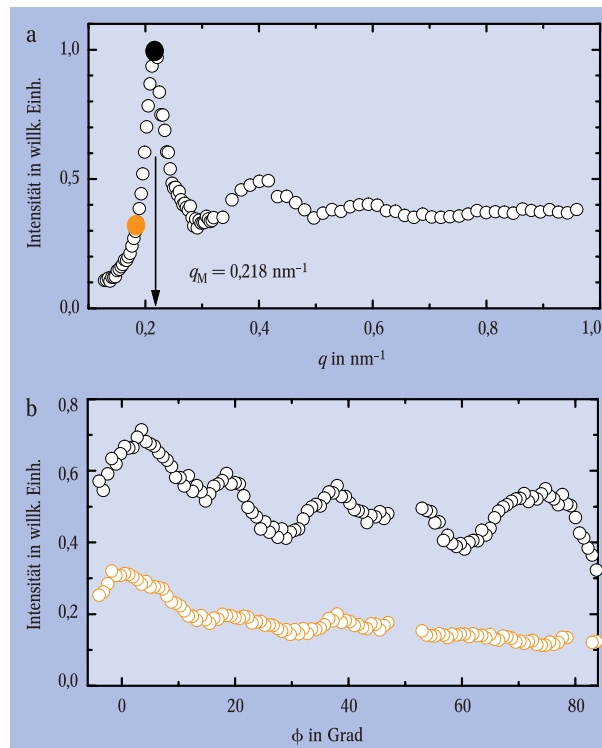


Abb.4:
 ► a) Flüssigstrukturfaktor von Blei parallel zur Grenzfläche. Die Lage des ersten Maximums ist identisch zum Volumenstrukturfaktor von Blei. Höhere Maxima sind stärker gedämpft.
 ► b) Azimutale Variation des Flüssigstrukturfaktors bei verschiedenen q -Werten. Es finden sich fünf Maxima in einem Quadranten der Ebene.

Die Streusignale aus der Flüssigkeitsschicht lassen sich dann auf zwei verschiedene Arten messen: (a) Der Detektor zum Nachweis der gestreuten Strahlung kann parallel zur Grenzfläche um die festgehaltene Probe gedreht werden. Hier wird der Flüssigstrukturfaktor $S(\vec{q}_{\parallel})$ als Funktion des Impulsübertrages \vec{q}_{\parallel} gemessen. (b) Die Probe kann um eine azimutale Achse ϕ senkrecht zur Grenzfläche bei festgehaltenem Detektor gedreht werden. Hier kann die azimutale Anisotropie des Flüssigstrukturfaktors $S(\vec{q}_{\parallel})$ bei verschiedenen (festgehaltenen) Impulsüberträgen q_{\parallel} gemessen werden. Abb. 4 zeigt die wichtigsten Ergebnisse beider Messungen für die von uns untersuchte Grenzfläche Pb(liq.)/Si(100). Die Lage des ersten Maximums des Flüssigstrukturfaktors $S(\vec{q}_{\parallel})$ ist – unabhängig vom Azimuth ϕ – identisch zum Volumenstrukturfaktor von flüssigem Blei (Abb. 4a) [13]. Höhere Maxima sind stärker ge-

dämpft und weisen auf eine modifizierte Abstandsverteilung $q(\vec{r}_{\parallel})$ hin. Abb. 4b zeigt die azimuthale Variation des Flüssigstrukturfaktors für zwei Impulsüberträge, im Maximum des Strukturfaktors ($q_{\parallel} = 0,218 \text{ nm}^{-1}$) und bei kleinerem Impulsübertrag deutlich unterhalb des Maximums im Strukturfaktor. Während im Maximum des Strukturfaktors eine starke azimuthale Variation zu finden ist, ist der Strukturfaktor bei kleinerem Impulsübertrag azimuthal nahezu strukturlos. Für Abstände, die in etwa dem Nächste-Nachbar-Abstand in der Flüssigkeit entsprechen, sind also in einer dünnen Schicht an der Grenzfläche starke Orientierungskorrelationen nachweisbar. Für größere Abstände r_{\parallel} gehen diese Korrelationen komplett verloren. Dies lässt sich leicht mit der starken Inkommensurabilität von Blei auf Silizium-(100)-Oberflächen verstehen. Der deutlich größere Atomdurchmesser der Bleiatome erlaubt es nicht, die lokalen Strukturen des flüssigen Bleis auf der periodischen Potentiallandschaft der Siliziumoberfläche fortzusetzen. Die Abstandsverteilung in Nächste-Nachbar-Schalen ist dort stark gestört.

Eine genauere Untersuchung der azimuthalen Anisotropie des Flüssigstrukturfaktors zeigt 20 Maxima auf dem Vollkreis. Da die Silizium-(100)-Grenzfläche bei Kontaktierung mit Metallen stets in primitiver Form vorliegt, ist damit automatisch eine vierzählige Koordination der Potentiallandschaft des Substrates verknüpft. Eine Entfaltung der azimuthalen Anisotro-

Bindungen von Blei parallel zur Grenzfläche mit den Minima im Elektronendichteüberlapp zwischen Blei- und Silizium-Atomen zusammen. Die Ausbildung von fünffach koordinierten Strukturen findet daher bevorzugt um die vierfach koordinierten Silizium-Atome an der Grenzfläche statt (Abb. 5a). Hier ist zu betonen, dass die in der Amplitude der azimuthalen Anisotropie angedeutete Orientierungskorrelation der Blei-Atome an der Grenzfläche stark gegenüber dem Volumen erhöht ist. Dies ist sicherlich auf den Einfluss der strukturierten (periodischen) Potentiallandschaft des Silizium-Substrates zurückzuführen.

Schlussbemerkung

Kürzlich durchgeführte Computersimulationen mit Hartkugelsystemen haben gezeigt, dass sich an Festflüssig-Grenzflächen bei Annahme einer starken Wechselwirkung zwischen Substrat und Flüssigkeit grenzflächennahe Schichten mit einem erhöhten Grad an fünfzähliger Nahordnung finden. Voraussetzung dafür ist eine Erhöhung der lokalen Dichte, während die Flüssigkeit selbst in einem nichtkristallinen Zustand verharrt [15]. Präzise Neutronenstreuexperimente zur Bestimmung des Volumenstrukturfaktors $S(q)$ von unterkühlten metallischen Flüssigkeiten wie Ni, Fe und Zr haben ebenfalls indirekte Hinweise auf die Existenz fünfzähliger Nahordnung ergeben [14]. So lässt sich etwa der Strukturfaktor für Ni bei $T = 1435 \text{ K}$ ($T_M = 1726 \text{ K}$) am besten mit größeren polytetraedrischen Aggregaten wie Dodekaedern modellieren. Dies zeigt, dass moderne Methoden der Strukturbestimmung schrittweise die nötige Präzision erreicht haben, um Licht auf eines der großen Probleme der kondensierten Materie zu werfen, das Verständnis der Struktur stark ungeordneter Systeme. Hier sind in der Zukunft durch den geplanten Bau von Röntgenlasern, die einen gepulsten, kohärenten Röntgenstrahl sehr hoher Intensität mit ultrakurzer Pulsdauer zur Verfügung stellen sollen, weitergehende Erkenntnisse zur Struktur von ungeordneten Systemen zu erwarten.

Danken möchte ich vor allem Herrn Oliver Klein sowie den weiteren Mitgliedern meiner Arbeitsgruppe, die alle bei der einen oder anderen Messfahrt an den Experimenten beteiligt waren. Die hier vorgestellten Resultate wären ohne die engagierte Arbeit vor allem von Herrn Klein, der kurz vor Fertigstellung seiner Dissertation auf dem Weg zum Synchrotron tödlich verunglückte, nicht zustande gekommen. Weiter möchte ich Herrn Veijo Honkimäki von der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle (ESRF) sowie Herrn Thomas Lippmann vom Hamburger Synchrotronstrahlungslabor (HASYLAB, DESY) danken, die sich an der Realisierung der Experimente beteiligt haben. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Dosch für seine Förderung und die über viele Jahre anhaltende fruchtbare Zusammenarbeit. Die Arbeiten wurden finanziell gefördert von der DFG im Rahmen des Schwerpunktprogramms Benetzung und Strukturbildung an Grenzflächen.

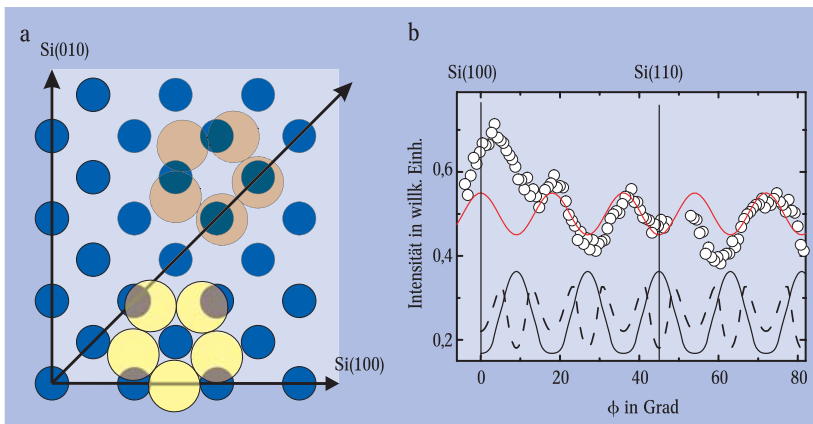


Abb. 5:

► a) Anordnung pentagonaler Struktur motive um verschiedene, vierfach koordinierte Plätze auf der Silizium-(100)-Grenzfläche.

► b) Aus der Lage der Maxima des Flüssigstrukturfaktors relativ zum Überlapp der Elektronendichten des festen Sub-

strates und der lokalen Strukturen der Flüssigkeit lässt sich die Lage des Adsorptionsplatzes für die fünffach koordinierten Strukturen bestimmen (Korrelation um Siliziumplätze (durchgezogene Linie) und um Leerstellen (unterbrochene Linie)).

pie mit der vierzähligen Symmetrie der Potentiallandschaft der Silizium-Grenzfläche lässt daher direkt auf die Existenz fünffach koordinierter lokaler Strukturen im flüssigen Blei schließen. Die einfachste Anordnung von Atomen in zwei Dimensionen, die mit dieser Symmetrie verträglich ist, entspricht einer pentagonalen Struktur (Abb. 5a). Die Lage der Maxima in der azimuthalen Verteilung des Flüssigstrukturfaktors lässt sich darüberhinaus direkt mit der Orientierung der Korrelationen in der lokalen Struktur des flüssigen Bleis an der Grenzfläche in Verbindung setzen, da die Orientierung der Maxima relativ zum Silizium Substrat bekannt ist (Abb. 5b). Da sich die Blei-Atome bevorzugt so anordnen, dass keine lokalen Elektronendichtespitzen an der Grenzfläche erzeugt werden, fallen die Maxima in den Orientierungen der Nächste-Nachbar-

Literatur

- [1] *D. R. Nelson, F. Spaepen*, Sol. Stat. Phys. **42**, 1 (1989).
- [2] *J. R. Errington, P. G. Debenedetti*, Nature **409**, 318 (2001);
- [3] *D. Turnbull*, J. Chem. Phys. **20**, 41 (1952); *F. C. Frank*, Proc. Roy. Soc. **215A**, 43 (1952).
- [4] *J. D. Bernal*, Nature **185**, 68 (1960); *G. D. Scott*, Nature **194**, 956 (1962); *J. D. Bernal*, Proc. Roy. Soc. **A280**, 299 (1964).
- [5] *P. J. Steinhardt, D. R. Nelson, M. Ronchetti*, Phys. Rev. B **28**, 784 (1983).
- [6] *J. Penfold*, Rep. Prog. Phys. **64**, 777 (2001).
- [7] *O. M. Magnussen et al.*, Phys. Rev. Lett. **74**, 4444 (1995); *M. J. Regan et al.*, Phys. Rev. Lett. **75**, 2498 (1995).
- [8] *S. W. Barton et al.*, Nature **321**, 685 (1986).
- [9] *A. K. Doerr et al.*, Europhys. Lett. **52**, 330 (2000).
- [10] *H. Reichert et al.*, Nature **408**, 839 (2000).
- [11] *H. Dosch*, Critical Phenomena at Surfaces and Interfaces, Springer Tracts in Modern Physics, Vol. 126, Springer, Berlin 1992.
- [12] *W. J. Huisman et al.*, Nature **390**, 379 (1997).
- [13] *D. M. North, J. E. Enderby, P. A. Egelstaff*, Proc. Phys. Soc. Ser. 2 Vol. 1, 784 (1968), *ibid.* 1075 (1968).
- [14] *T. Schenk, D. Holland-Moritz, D. M. Herlach, V. Simonet, R. Bellisent*, Verhandl. DPG (VI) **37**, 269 (2002)
- [15] *M. Heni, H. Löwen*, Phys. Rev. E **65**, 021501 (2002).

Der Autor

Harald Reichert hat sich in der wissenschaftlichen Gemeinde vor allem durch seine unkonventionellen experimentellen Ideen einen Namen gemacht. 1995 promovierte er an der LMU München über Oberflächensegregation in Metall-Legierungen. Nach einem Postdoc-Aufenthalt in Houston, Texas, ging Reichert an das Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart, wo er heute das Projekt „Strukturbildung an fest-flüssig-Grenzflächen“ leitet. Reichert gilt als inspirierender Wissenschaftler, der es auch hervorragend versteht, Schüler und Studenten für die Physik zu begeistern. Obwohl geunknt wird, dass er sich im reziproken Raum am wohlsten fühlt, nutzt er seine Freizeit am liebsten, um seiner heimlichen Leidenschaft zu frönen: dem Klettern.

