

Hochdrucksynthese von Pr_2O_5 – Ein einzigartiges Lanthanoid(IV) Oxid Peroxid

Niko T. Flosbach,* Lukas Briuning, Pascal L. Jurzick, Elena Bykova, Marcus Ekholm, Igor A. Abrikosov, Mohammad Amirabbasi, Mohamed Mezouar, Björn Wehinger, Nico Giordano, Timofey Fedotenko, Vitali Prakapenka, Stella Chariton, Mathias S. Wickleder,* und Maxim Bykov*

Abstract: Die Reaktion von Praseodym(IV)-oxid und Sauerstoff bei 27 GPa in einer Diamantstempelzelle lieferte das Oxid Peroxid $\text{Pr}_2^{\text{IV}}(\text{O}_2)\text{O}_3$, welches bei unterschiedlichen Druckpunkten durch Einkristallstrukturanalyse an multikristallinem Material, Raman-Spektroskopie sowie durch quantenchemische Rechnungen charakterisiert wurde. Die Anwesenheit vierwertiger Praseodymionen wird durch Berechnungen der elektronischen Struktur unterstützt, die eine Bandlücke von ca. 1,2 eV vorhersagen, was mit dem antizipierten chemischen Modell eines ionischen Festkörpers übereinstimmt. $\text{Pr}_2(\text{O}_2)\text{O}_3$ stellt die bislang sauerstoffreichste binäre Verbindung eines Lanthanoide mit Sauerstoff dar und ist das erste Beispiel eines Peroxidanions neben Pr^{4+} . Darüber hinaus demonstrieren diese Ergebnisse, dass Sauerstoff eine Komproportionierung eingeht um Peroxidionen zu bilden, bevor die Praseodymionen über die Oxidationsstufe + IV hinaus oxidiert werden. Die direkte Oxidation der Oxidionen durch Pr^{4+} wurde durch ein Kontrollexperiment in Argon anstelle von Sauerstoff ausgeschlossen, in welchem keine Oxidation der Oxidionen beobachtet wurde.

Die einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften der Lanthanoide machen sie zu unersetzblichen Bestandteilen moderner Technologien, wie z.B. Elektronik, optischer Bauteile und magnetischer Materialien.^[1] Die Chemie der Lanthanoide wird von der Oxidationsstufe + III dominiert, welche die stabilste Oxidationsstufe aller Elemente der Gruppe ist. Jedoch beeinflussen Unterschiede in der Elektronenkonfiguration der Lanthanoide, hervorgerufen durch veränderte Oxidationsstufen, die physikalischen Eigenschaften ihrer Ionen deutlich. Daher ist die Suche nach neuen Verbindungen, in welchen die Lanthanoide nicht in ihrer + III-Oxidationsstufe vorliegen, nicht bloß ein Unterfangen, welches dazu dient das Grundwissen ihrer Chemie zu erweitern, sondern wird auch durch das Potenzial motiviert neue Materialien mit besonderen physikalischen und chemischen Eigenschaften zu entwickeln.

Einige Elemente der Reihe sind in der Lage stabile Verbindungen in ihrer zweiwertigen Oxidationsstufe zu bilden. Die *klassischen* zweiwertigen Lanthanoide sind Samarium, Europium und Ytterbium. Aufgrund der chemischen Zugänglichkeit hat sich die Forschung zu zweiwertigen Lanthanoiden historisch auf diese drei Elemente konzentriert, wenngleich jüngere Arbeiten gezeigt haben, dass die gesamte Reihe, mit Ausnahme des radioaktiven

[*] N. T. Flosbach, P. L. Jurzick, Prof. Dr. M. S. Wickleder
University of Cologne
Institute of Inorganic Chemistry
Greinstr. 6, 50939 Cologne, Germany
E-mail: n.flosbach@uni-koeln.de
mathias.wickleder@uni-koeln.de
L. Briuning, P. L. Jurzick, Prof. Dr. M. Bykov
Goethe University Frankfurt
Institute of Inorganic and Analytical Chemistry
Max-von-Laue-Str. 7, 60438 Frankfurt am Main, Germany
E-mail: bykov@chemie.uni-frankfurt.de
Prof. Dr. E. Bykova
Goethe University Frankfurt
Institute of Geosciences
Altenhöferallee 1, 60438 Frankfurt, Germany
Dr. M. Ekholm, Prof. Dr. I. A. Abrikosov
Linköping University
Department of Physics, Chemistry and Biology
SE-581 83, Sweden

Dr. M. Amirabbasi
Fachgebiet Materialmodellierung
Institut für Materialwissenschaft
Technische Universität Darmstadt
Otto-Berndt-Str. 3, D-64287 Darmstadt, Germany
Dr. M. Mezouar, Dr. B. Wehinger
European Synchrotron Radiation Facility
Grenoble Cedex F-38043, France
Dr. N. Giordano, Dr. T. Fedotenko
Deutsches Elektronen Synchrotron
22607 Hamburg, Germany
Prof. Dr. V. Prakapenka, Dr. S. Chariton
University of Chicago
Center for Advanced Radiation Sources
Chicago, IL, USA

© 2025 Die Autoren. Angewandte Chemie veröffentlicht von Wiley-VCH GmbH. Dieser Open Access Beitrag steht unter den Bedingungen der Creative Commons Attribution License, die jede Nutzung des Beitrages in allen Medien gestattet, sofern der ursprüngliche Beitrag ordnungsgemäß zitiert wird.

Promethiums, zumindest in metallorganischen Komplexen in ihrer zweiwertigen Oxidationsstufe stabilisiert werden können.^[2-4] Zusätzlich existieren auch diverse *nicht-klassische* Lanthanoide in Form reduzierter Halide.^[5]

Im Gegensatz zu den zweiwertigen Lanthanoiden ist der Zugang ihrer vierwertigen Gegenspieler deutlich schwieriger aufgrund der starken Oxidationswirkung der entsprechenden Ionen. So ist das Ce⁴⁺-Ion das einzige Ln⁴⁺-Ion, welches in einer großen Vielfalt von Verbindungen verfügbar ist, trotz seiner stark oxidierenden Wirkung. Wenn die Standardoxidationspotentiale E_0 der Ln³⁺/Ln⁴⁺ verglichen werden, folgen die Paare Pr³⁺/Pr⁴⁺ ($E_0 = +3,2$ V) und Tb³⁺/Tb⁴⁺ ($E_0 = +3,1$ V) auf Ce³⁺/Ce⁴⁺ ($E_0 = +1,74$ V) in der Reihe der stabilsten Ln⁴⁺-Ionen.^[6-7] Wie für solch stark oxidierende Kationen zu erwarten ist, ist die Chemie von Pr⁴⁺ und Tb⁴⁺ fast ausschließlich auf Oxide und Fluoride beschränkt.^[8-24] Selbst einfache Salze der Form LnO₂ und LnF₄ (für Ln=Pr, Tb) benötigen für ihre Synthese in der Regel harsche Reaktionsbedingungen. Die jüngsten Entdeckungen metallorganischer Komplexe von Tb⁴⁺ und Pr⁴⁺, sowie die Synthese von K₂Tb^{IV}Ge₂O₇ und des gemischtvivalenten Cs₈Tb₂^{III}Tb^{IV}Ge₉O₂₇ beweisen eindrücklich, dass die Chemie des vierwertigen Terbiums und des vierwertigen Praseodyms über einfache Oxide und Fluoride hinaus erweitert werden kann, wodurch sich die Gelegenheit offenbart, ihre optischen und magnetischen Eigenschaften genauer zu untersuchen.^[26-36] Durch die kombinierte theoretische und experimentelle Analyse ausgewählter Beispiele von Pr⁴⁺-enthaltenden Verbindungen wurde demonstriert, dass das 4f¹-konfigurierte Ion nicht den typischerweise in 4fⁿ-konfigurierten Ionen beobachteten Trends folgt, sondern sich eher den frühen Actinoiden ähnelt.^[37] Aufgrund der Seltenheit von Materialien, die Pr⁴⁺-Ionen enthalten, sind solche Arbeiten bisher auf einige wenige Systeme limitiert, was die Möglichkeit neue Trends zu etablieren und potentielle Anwendungen zu untersuchen stark einschränkt.

Obwohl Nd⁴⁺ und Dy⁴⁺ eine noch stärkere Neigung zeigen in ihre dreiwertigen Oxidationsstufen reduziert zu werden ($E_0 = +5,0$ V für Nd³⁺/Nd⁴⁺ und $E_0 = +5,2$ V für Dy³⁺/Dy⁴⁺),^[6-7] wurden bereits Fluoride der Form Cs₂MLn^{IV}F₇ (M=K, Rb, Cs; Ln=Nd, Dy) durch die Oxidation mit Fluor unter hohem Druck hergestellt.^[38-39] Die binären Fluoride Ln^{IV}F₄ (Ln=Nd, Dy) wurden bisher nur in Edelgasmatrix beobachtet.^[40] Beim Versuch ein Perowskit der Form BaNd^{IV}O₃ zu synthetisieren, indem Bariumperoxid und Neodym(III)-oxid bei 4 GPa und 1500 °C umgesetzt wurden, erhielten Range et al. ein Oxid Peroxid mit der empirischen Formel NdO₂, das mittels Einkristallstrukturanalyse und Schwingungsspektroskopie als Nd^{III}(O₂)O₂ identifiziert wurde.^[41-43] Diese einzigartige Entdeckung wirft die Frage auf, ob Oxid Peroxide auch mit Lanthanoiden in anderen Oxidationsstufen als + III existieren können, wenn die Synthesebedingungen entsprechend angepasst werden.

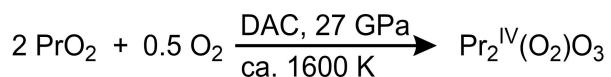
Kürzlich erschienene Arbeiten haben gezeigt, dass eine Vielfalt außergewöhnlicher Verbindungen, wie z.B. CaO₃, Xe₃O₂, Xe₂O₅ oder FeO₂, welche durch andere Methoden unzugänglich sind, synthetisiert werden können indem die Reaktivität von Sauerstoff bei hohem Druck ausgenutzt wird.^[44-46] In der vorliegenden Arbeit präsentieren wir die

Synthese und die Kristallstruktur des einzigartigen Oxid Peroxids Pr₂^{IV}(O₂)O₃ mit der empirischen Formel Pr₂O₅, welches durch Oxidation von PrO₂ bei 27 GPa in einer Diamantstempelzelle erhalten wurde (Schema 1).

Die Titelverbindung konnte durch Einkristallstrukturanalyse von polykristallinen Proben bei drei Druckpunkten (27 GPa, 20 GPa und 11 GPa, siehe Table S1) identifiziert werden. Die Kristallstruktur wird weiter unten genauer beschrieben. In situ Ramanspektroskopie des Reaktionsproduktes in der Diamantstempelzelle offenbarte zwei schwache Signale bei 820 cm⁻¹ und bei 848 cm⁻¹, die durch den Vergleich mit ähnlichen Verbindungen den charakteristischen Schwingungen des Peroxidions zugeordnet werden (Abbildung 1).^[47-48]

Das niedrige Signal zu Rausch Verhältnis wird durch das geringe Verhältnis von Pr₂(O₂)O₃ neben anderen Stoffen verursacht, das durch das lokale Erhitzen entsteht. Um die Autooxidation von Praseodymdioxid als möglichen Mechanismus zur Bildung von Pr₂(O₂)O₃ auszuschließen, wurde das Experiment mit Argon als druckübertragendes Medium anstelle von Sauerstoff wiederholt, wobei der Cotunnit-Typ von PrO₂ als Hauptphase erkannt wurde, was bestätigt, dass ein zweiter Reaktand nötig ist, um Pr₂(O₂)O₃ zu bilden.^[49]

Weil die strukturellen Grundmotive dieselben für alle drei Druckpunkte (27, 20 und 11 GPa) sind, werden die Einzelheiten anhand der Struktur bei 11 GPa erläutert, welche dem Normaldruck am nächsten liegt. Pr₂(O₂)O₃ kristallisiert in der orthorhombischen Raumgruppe *Pbcn* (Nr. 60) mit vier Formeleinheiten pro Elementarzelle. Die Pr⁴⁺-Ionen bilden als Teilstruktur ein verzerrtes, kubisch innenzentriertes Gitter aus, in dem die Anionen O₂ und O₃



Schema 1. Die Oxidation von PrO₂ mit O₂ bei 27 GPa in einer Diamantstempelzelle resultierte in der Bildung von Pr₂(O₂)O₃.

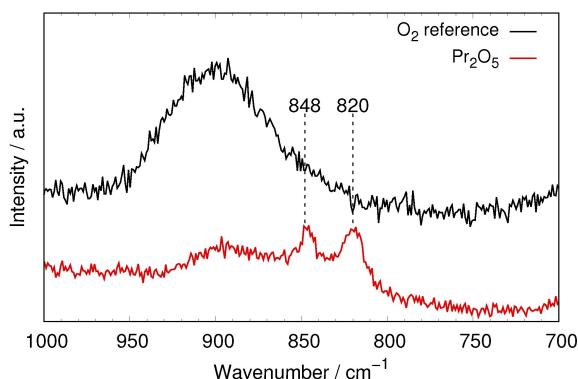


Abbildung 1. Ausschnitt des Ramanspektrums der Reaktionskammer bei 27 GPa. Zur Peroxideinheit von Pr₂(O₂)O₃ gehörende Schwingungen sind hervorgehoben. Die Spektren wurden mit einer Anregungswellenlänge von 532 nm gemessen. Das schwarze Spektrum ist ein Referenzspektrum von reinem Sauerstoff ohne Praseodymoxide, das mit demselben experimentellen Aufbau gemessen wurde.

Tetraederlücken, und die Peroxidionen Oktaederlücken besetzen (Abbildung 2, Abbildung 3).

Die $[OPr_4]$ -Polyeder um O2 und O3 weichen signifikant von der idealen Geometrie eines Tetraeders ab. Der maximale Winkel um Pr1-O2-Pr1 im Koordinationspolyeder von O2 beträgt $123,8(3)^\circ$, während der minimale Winkel $99,6(2)^\circ$ und der Mittelwert $109,4^\circ$ beträgt. Die Pr–O2 Abstände reichen von $234,7(5)$ bis $221,4(5)$ pm bei einem mittleren Abstand von $230,3$ pm über alle vier Bindungen. Die Pr–O3 Abstände sind etwas länger. Da O3 auf einer zweizähligen Drehachse liegt (Wyckoff-Lage = $4c$), gibt es nur zwei unterschiedliche Pr–O3 Abstände, die diskutiert werden müssen ($234,5(3)$ pm und $237,7(3)$ pm). Die Abweichung des $[OPr_4]$ -Polyeders um O3 von der idealen Tetraedergeometrie ist noch stärker ausgeprägt als bei O2. Der größte Pr1-O3-Pr1 Winkel bei 11 GPa beträgt $137,3(3)^\circ$, was wesentlich größer ist als der ideale Tetraederwinkel von $109,5^\circ$. Gegenläufig dazu misst der kleinste Winkel desselben Polyeders bloß $97,73(1)^\circ$, was zusätzlich die starke Verzerrung im Vergleich zur idealen Tetraedergeometrie bezeugt. Diese Verzerrung ist das Resultat der starken Abweichung des Pr^{4+} -Teilgitters von der idealen kubisch innenzentrierten Anordnung. Die aus O1-Atomen zusammengesetzten Peroxidanionen besetzen Oktaederlücken im kubisch innenzentrierten Teilgitter der Pr^{4+} -Ionen, wie in Abbildung 2 dargestellt ist. Auf gegenüberliegenden Seiten koordinieren die Peroxidanionen jeweils an ein Pr1-Ion mit beiden Atomen (η^2) mit Pr–O Abständen von $256,0(5)$ und $252,3(5)$ pm. Die terminale Koordination zu Pr1 schließt vier Pr^{4+} -Ionen ein, zwei für jedes Sauerstoffatom, wobei die Abstände $242,3(5)$ pm und $240,2(5)$ pm betragen. Mit einem O–O Abstand von $146(1)$ pm liegt der Abstand in einem typischerweise für Peroxi-

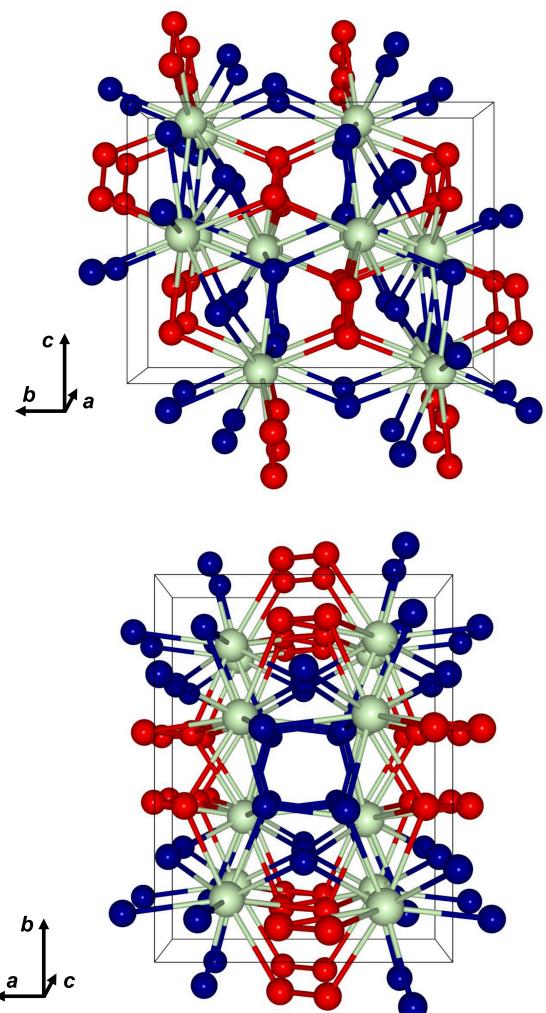


Abbildung 3. Kristallstruktur von $Pr_2(O_2)O_3$ bei 11 GPa, dargestellt entlang der kristallographischen a- und c-Achse. Grün = Praseodym, blau = Oxid, rot = Peroxid.

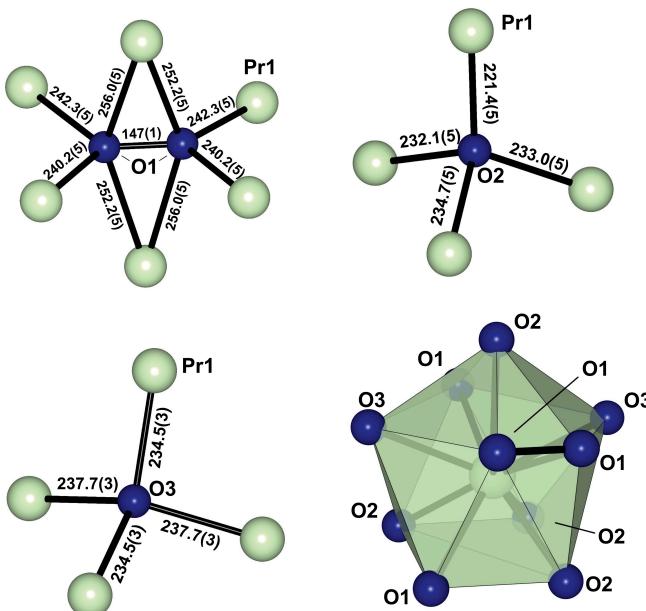


Abbildung 2. Koordinationspolyeder des Peroxidions, der Oxidionen O2 und O3 und des Pr^{4+} -Ions. Die abgebildeten Abstände beziehen sich auf die Struktur bei 11 GPa. Die Abstände sind in Einheiten von pm angegeben.

dionen beobachteten Bereich, selbst wenn der hohe Druck berücksichtigt wird.^[47–48,50]

Das Koordinationspolyeder um Pr1 umfasst zehn Sauerstoffatome, wovon vier Teil von Peroxidionen sind und die verbleibenden sechs Oxidionen sind. Das Koordinationspolyeder der Pr^{4+} -Ionen kann als verzerrtes, erweitertes Sphe-nocorona (Johnson-Körper Nr. 87) aufgefasst werden mit einem Verzerrungsgrad nach CShM-Berechnungen von $2,427$.^[51] Der durchschnittliche Pr–O Abstand im Polyeder beträgt $238,4(5)$ pm, wobei die kürzeste Distanz mit $221,4(5)$ pm zwischen Pr1 und O2 und die längste Pr–O Distanz mit $256,0(5)$ pm zwischen dem η^2 -koordinierenden Peroxidion und Pr1 vorliegen. Trotz der im Vergleich zur achtfachen Koordination von Nd^{3+} in $Nd_2^{III}(O_2)O_2$ ($d_{avg}(Nd–O) = 247$ pm) höheren Koordinationszahl des Pr^{4+} -Ions sind die Lanthanoid-Sauerstoff Abstände hier deutlich kürzer, was eine höhere Ladung des Kations impliziert, selbst wenn der höhere Druck berücksichtigt wird.^[41] Der Ionenradius von Pr^{3+} beträgt ca. 118 pm für den Fall einer neunfachen Koordination (für zehnfache Koordination ist kein Wert

tabelliert), während jener eines vierfach koordinierten Oxdions mit 138 pm angegeben wird,^[52] was in einem zu erwartenden $\text{Pr}^{3+}-\text{O}^{2-}$ Abstand von 256 pm resultiert, was signifikant länger ist, als der in der Titelverbindung beobachtete Abstand (Abbildung 2).

Bei höheren Drücken kristallisiert $\text{Pr}_2(\text{O}_2)\text{O}_3$ in der gleichen orthorhombischen Raumgruppe $Pbcn$ in derselben Struktur wie bei 11 GPa. Eine umfassende Abhandlung der systematischen Trends der Druckabhängigkeit von ausgewählten strukturellen Motiven wird im folgenden Abschnitt durchgeführt.

Die wesentlichste Veränderung bei höherem Druck ist die Kompression der gesamten Struktur, die in einer Verkürzung der Gitterparameter und damit in einer Verkleinerung des molaren Volumens der Verbindung resultiert. Die Gitterparameter sind für alle experimentellen Druckpunkte zusammen mit theoretisch berechneten Daten in Abbildung 4 dargestellt. Das Zellvolumen nimmt von $305,33(7) \cdot 10^6 \text{ pm}^3$ bei 11 GPa zu $286.19(1) \cdot 10^6 \text{ pm}^3$ bei 27 GPa um ca. 6,3 % ab.

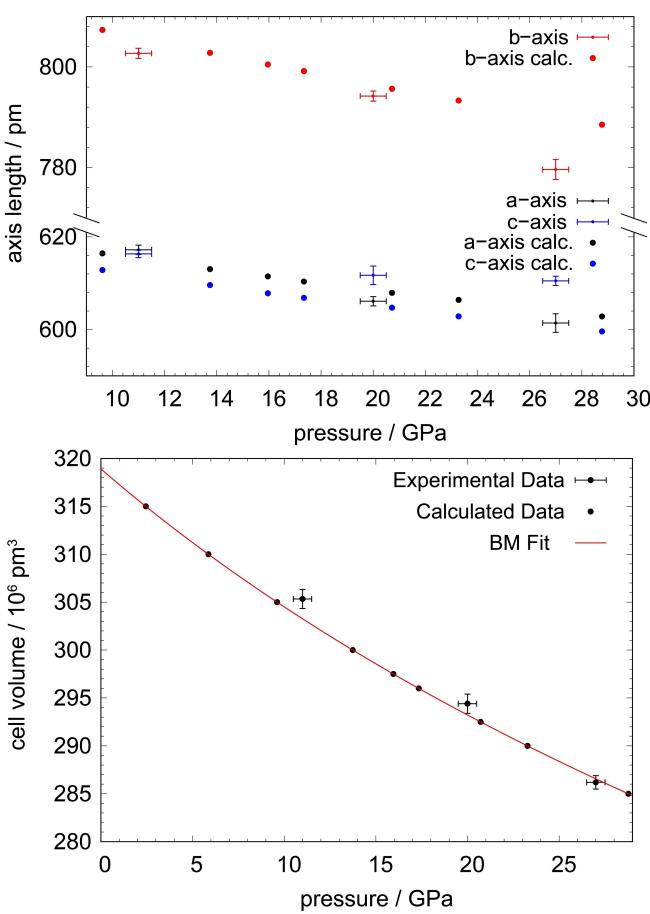


Abbildung 4. Gitterparameter von $\text{Pr}_2(\text{O}_2)\text{O}_3$ bei unterschiedlichen Druckpunkten (oben) und Zellvolumen der Elementarzelle bei unterschiedlichen Druckpunkten (oben). Die berechneten Werte sind als Punkte dargestellt, während experimentell ermittelte Daten als Kreuze mit Fehlerbalken dargestellt sind. Die rote Linie in der unteren Abbildung stellt die Birch-Murnaghan Zustandsgleichung dar, die durch theoretische Berechnungen erhalten wurde.

Während die Länge der c -Achse nur von 616,33(8) pm bei 11 GPa zu 610,5(5) pm bei 27 GPa abnimmt, was einer relativen Kompression von ca. 1 % entspricht, werden die a - und b -Achsen deutlich stärker komprimiert. Die Länge der a -Achse verkleinert sich von 617,2(1) pm auf 601,4(2) pm, was einer Änderung von 2,5 % entspricht, während die b -Achse einer etwas größeren relativen Veränderung von ca. 2,9 % von 802,7(1) pm auf 779,6(2) pm unterliegt. Die Abnahme der Gitterparameter entlang der a - und b -Achsen folgt keinem linearen Trend, während die Kompression der Gitterparameter entlang der c -Achse innerhalb der Fehlertoleranzen linear verläuft. Natürlicherweise wird die Kompression der Elementarzelle durch eine Verkürzung der chemischen Bindungen begleitet. Die $\text{O}-\text{O}$ Distanz des Peroxidanions nimmt um ca. 2 % von 147(1) pm bei 11 GPa auf 144,1(7) pm bei 27 GPa ab, wie in Abbildung 5 gezeigt ist.

Mit zunehmenden Druck verliert das $[\text{PrO}_{10}]$ -Polyeder ca. 6,2 % seines Volumens zwischen 11 GPa und 27 GPa ($285,1(2) \cdot 10^6 \text{ pm}^3$ bis $267,3(2) \cdot 10^6 \text{ pm}^3$). Gleichermaßen nimmt der durchschnittliche $\text{Pr}-\text{O}$ Abstand im Polyeder von 238,4 pm bei 11 GPa auf 233,3 pm bei 27 GPa ab. Alle diskutierten Werte sind in Table S2 zusammengefasst.

Die ab-initio Berechnungen reproduzieren die orthorhombische $Pbcn$ Struktur bei allen Volumina. Wir konnten außerdem eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Gitterparametern erhalten. Nichtsdestotrotz weicht die monoton abnehmende Druckabhängigkeit der theoretisch vorhergesagten Gitterparameter leicht von den experimentell beobachteten Trends ab, was vermutlich auf die nicht-hydrostatischen Bedingungen in der Diamantstempelzelle zurückzuführen ist. Durch Anpassen der Birch-Murnaghan Zustandsgleichung an die berechneten Druck-Volumen Daten erhalten wir einen Bulk Modul $B_0 = 192,8 \text{ GPa}$ und $B_0' = 5,0$ bei einem Gleichgewichtsvolumen $V_0 = 319,2 \cdot 10^6 \text{ pm}^3$.^[53] Die Berechnungen reproduzieren außerdem die abnehmende $\text{O}-\text{O}$ Entfernung der Peroxideinheit, wie in Abbildung 5 dargestellt ist.

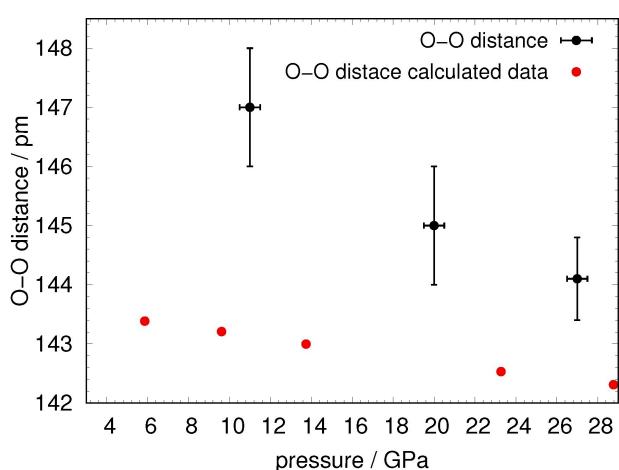


Abbildung 5. Druckabhängigkeit der $\text{O}-\text{O}$ Distanz im Peroxidanion in $\text{Pr}_2(\text{O}_2)\text{O}_3$. Theoretisch berechnete Daten sind in rot dargestellt.

Die Berechnungen der elektronischen Struktur (siehe Abbildung S5) offenbaren eine isolierende Bandlücke von 1,2 eV und ein lokales magnetisches Moment für Pr von $\sim 1 \mu_B$. Dies ist konsistent mit dem Modell eines ionischen Salzes, das 4f¹-konfigurierte Pr⁴⁺-Ionen neben Oxid- und Peroxidionen mit jeweils lokalisierten negativen Ladungen enthält. Wir vermuten, dass die Bildung der +IV-Oxidationsstufe durch die Bildung der Peroxid Dimere ermöglicht wird, die antibindende Zustände ausbilden und die Oxidation über +IV hinaus verhindern. Dies wird weiterhin durch die berechneten elektronischen Zustandsdichten unterstützt, die pro Formeleinheit zwei Elektronen im antibindenden Zustand der Peroxidionen zeigen (siehe SI).

Die Reaktion von Praseodymdioxid und Sauerstoff bei 27 GPa lieferte das neuartige Lanthanoid(IV) Oxid Peroxid Pr₂^{IV}(O₂)O₃ mit der empirischen Formel Pr₂O₅ und dem höchsten Sauerstoffanteil aller bekannten binären Verbindungen zwischen Sauerstoff eines Lanthanoids. Pr₂(O₂)O₃ ist das bislang zweite Lanthanoid Oxid Peroxid, welches entdeckt wurde und fügt somit dieser exklusiven Gruppe von dieser Verbindungen ein weiteres Mitglied hinzu. Seine Struktur wurde durch Einkristallstrukturanalyse aufgeklärt und weiter durch quantenchemische Rechnungen, sowie Raman-Spektroskopie untermauert. Bei Dekompression der Probe zersetzte sich die Titelverbindung zwischen 11 GPa und Normaldruck. Durch die Untersuchung der Verbindung bei unterschiedlichen Druckpunkten zwischen 11 und 27 GPa zusammen mit den theoretischen Rechnungen konnte die Birch-Murnaghan Zustandsgleichung von Pr₂(O₂)O₃ ermittelt werden.

In unseren Experimenten wurden keine Hinweise auf die Oxidation von Praseodym jenseits der +IV-Oxidationsstufe beobachtet, was darauf hindeutet, dass die Oxidationsstufe + V unter den angewendeten experimentellen Parametern, zumindest in binären Oxiden unzugänglich ist. Über die Anwesenheit von vierwertigen Praseodymionen neben Peroxidionen wurde bislang noch nie berichtet und auch für andere vierwertige Lanthanoidionen sind solche Berichte zu unserem besten Wissen nicht vorhanden. Die elektronische Struktur wurde durch die theoretische Berechnung der Bandstruktur untersucht, welche die Zuordnung der Ladungsverhältnisse innerhalb des Festkörpers bestätigt. Diese Entdeckungen bilden das Fundament für tiefgründigere Untersuchungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften des 4f¹-konfigurierten Pr⁴⁺-Ions, die sich wie jüngst demonstriert wurde, deutlich von den allgemeinen Trends innerhalb der Lanthanoide unterscheiden.^[37]

Hintergrundinformationen

Experimentelle Details; Kristallographische Informationen zu Pr₂(O₂)O₃ (Table S1); Zusammenfassung ausgewählter interatomarer Abstände (Table S2); Vollständiges Raman-Spektrum (Abb. S1); XRD-Map bei 27 GPa (Abb. S2); XRD-Map bei 20 GPa (Abb. S3); XRD-Map bei 11 GPa (Abb. S4); Berechnete Zustandsdichten (Abb. S5); CCDC-Eintragungen <https://www.ccdc.cam.ac.uk/services/structures?id=doi:10.1002/anie.202422929> 2303283 (für Struktur

bei 27 GPa), 2303282 (für Struktur bei 20 GPa) und 2303284 (für Struktur bei 11 GPa) enthalten zusätzliche kristallographische Daten für diese Publikation. Diese Daten werden kostenlos vom Cambridge Crystallographic Data Centre und dem Fachinformationszentrum Karlsruhe <http://www.ccdc.cam.ac.uk/structures> zur Verfügung gestellt.

Danksagung

Teilweise finanziert durch die Europäische Union (ERC, HIPMAT, 101077963). Ansichten und Meinungen der Autoren entsprechen nicht notwendigerweise denen der Europäischen Union oder des European Research Council. Weder die Europäische Union, noch die genehmigende Behörde kann für diese verantwortlich gemacht werden. M. B. dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG Emmy-Noether Projekt BY112/2-1) für die Unterstützung. E. B. dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG Emmy-Noether Projekt BY101/2-1) für die Unterstützung. Wir bedanken uns bei der European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) unter der Antragsnummer CH6475. Wir bedanken uns beim DESY (Hamburg, Deutschland), ein Mitglied der Helmholtz Association HGF für die Bereitstellung der experimentellen Gerätschaften. Teile dieser Arbeit wurden an der Beam Line P02.2 von PETRA III durchgeführt. Die Messzeit wurde im Rahmen des Antrags I-20220041 zur Verfügung gestellt. Die Benutzung des GSECARS Raman Labor Systems wurde vom NSF MRI Antrag (EAR-1531583) unterstützt. Teile dieser Arbeit wurden am GeoSoilEnviroCARS (The University of Chicago, Sector 13), Advanced Photon Source (APS), Argonne National Laboratory durchgeführt. GeoSoilEnviroCARS wird durch die National Science Foundation – Earth Sciences (EAR – 1634415) unterstützt. Diese Arbeit verwendet Ressourcen der Advanced Photon Source, einer U.S. Department of Energy (DOE) Office of Science User Facility, die vom Argonne National Laboratory für das DOE Office of Science unter der Vertragsnummer DE-AC02-06CH11357 operiert wird. M. E. und I. A. danken der Knut and Alice Wallenberg Foundation (Wallenberg Scholar grant Nr. KAW-2018.0194) für die Unterstützung. Dem Swedish Research Council (VR) grant Nr. 2023-05358, der Swedish Government Strategic Research Area in Material Science on Functional Materials der Linköping University (Faculty Grant SFO-Mat-LiU Nr. 2009 00971), der Swedish Government Strategic Research Area, sowie dem Swedish e-Science Research Centre sei ebenfalls gedankt. Wir danken der National Academic Infrastructure for Supercomputing in Sweden (NAIIS) und der Swedish National Infrastructure for Computing (SNIC), teilweise finanziert durch das Swedish Research Council durch Förderanträge Nr. 2022-06725 und Nr. 2018-05973 für den Zugang zum LUMI Supercomputer des EuroHPC Joint Undertaking, gestellt durch CSC (Finnland) und dem LUMI Konsortium. Die Berechnungen wurden weiterhin ermöglicht durch die Ressourcen der National Academic Infrastructure for Supercomputing in Sweden (NAIIS) und der Swedish National Infrastructure for Computing (SNIC) im National Supercomputer Centre

(NSC), sowie dem PDC Center for High Performance Computing, teilweise finanziert durch das Swedish Research Council durch die Fördernummern 2022-06725 und 2018-05973. N. F. und M. W. danken Prof. Martin Jansen für die Spende von Sauerstoff Autoklaven, die für die Synthese von PrO_2 benutzt wurden. Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Interessenkonflikt

Die Autoren erklären, dass keine Interessenkonflikte vorliegen.

Erklärung zur Datenverfügbarkeit

Die Daten, die die Ergebnisse dieser Studie unterstützen, sind in den Hintergrundinformationen zu diesem Artikel verfügbar. Die experimentellen Synchrotron Diffraktionsdaten, welche an der ESRF Beamlne ID27 gemessen wurden, sind unter doi.org/10.15151/ESRF-DC-2044641962 verfügbar.

- [1] S. T. Liddle, D. P. Mills, L. S. Natrajan, *Lanthanides And Actinides, The: Synthesis, Reactivity, Properties And Applications*, World Scientific, **2021**.
- [2] P. B. Hitchcock, M. F. Lappert, L. Maron, A. V. Protchenko, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2008**, *120*, 1510–1513.
- [3] M. R. MacDonald, J. E. Bates, M. E. Fieser, J. W. Ziller, F. Furche, W. J. Evans, *J. Am. Chem. Soc.* **2012**, *134*, 8420–8423.
- [4] M. R. MacDonald, J. E. Bates, J. W. Ziller, F. Furche, W. J. Evans, *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, *135*, 9857–9868.
- [5] G. Meyer, M. S. Wickleder, *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths* **2000**, *28*, 53–129.
- [6] L. J. Nugent, R. D. Baybarz, J. L. Burnett, J. L. Ryan, *J. Inorg. Nucl. Chem.* **1971**, *33*, 2503–2530.
- [7] L. R. Morss, *Chem. Rev.* **1976**, *76*, 827–841.
- [8] D. M. Gruen, W. C. Koehler, J. J. Katz, *J. Am. Chem. Soc.* **1951**, *73*, 1475–1479.
- [9] B. B. Cunningham, D. C. Feay, M. A. Rollier, *J. Am. Chem. Soc.* **1954**, *76*, 3361–3363.
- [10] Y. M. Kiselev, V. B. Sokolov, *Zh. Neorg. Khim.* **1984**, *29*, 857–859.
- [11] R. Hoppe, K.-M. Rödder, *Z. Anorg. Allg. Chem.* **1961**, *312*, 277–281.
- [12] E. Paletta, R. Hoppe, *Naturwissenschaften* **1966**, *53*, 611–612.
- [13] R. Hoppe, K. Seeger, *Naturwissenschaften* **1968**, *55*, 297–297.
- [14] R. Wolf, R. Hoppe, *Z. Anorg. Allg. Chem.* **1985**, *522*, 39–47.
- [15] R. Wolf, R. Hoppe, *Z. Anorg. Allg. Chem.* **1988**, *556*, 97–108.
- [16] Y. Laligant, A. Le Bail, G. Ferey, D. Avignant, J. C. Cousseins, *Eur. J. Solid State Inorg. Chem.* **1988**, *25*.
- [17] H. A. Pagel, P. H. M.-P. Brinton, *J. Am. Chem. Soc.* **1929**, *51*, 42–54.
- [18] J. Soriano, M. Givon, J. Shamir, *Inorg. Nucl. Chem. Lett.* **1966**, *2*, 13–14.
- [19] T. Mikulas, M. Chen, D. A. Dixon, K. A. Peterson, Y. Gong, L. Andrews, *Inorg. Chem.* **2014**, *53*, 446–456.
- [20] A. J. Jacobson, B. C. Tofield, B. E. F. Fender, *Acta Crystallogr.* **1972**, *28*, 956–961.
- [21] Y. Hinatsu, M. Itoh, N. Edelstein, *J. Solid State Chem.* **1997**, *132*, 337–341.
- [22] V. R. Wolf, R. Hoppe, *J. Solid State Chem.* **1987**, *70*, 12–18.
- [23] H. Brunn, R. Hoppe, *Z. Anorg. Allg. Chem.* **1977**, *430*, 144–154.
- [24] L. B. Asprey, J. S. Coleman, M. J. Reisfeld, in *Advances in Chemistry*, Vol. 71, ACS Publications, **1967**, pp. 122–126.
- [25] G. Meyer, L. R. Morss, *Synthesis of lanthanide and actinide compounds*, Vol. 2, Springer Science & Business Media, **2012**.
- [26] K. Fulle, L. D. Sanjeeva, C. D. McMillen, Y. Wen, A. C. Rajamanthilage, J. N. Anker, G. Chumanov, J. W. Kolis, *Inorg. Chem.* **2017**, *56*, 6044–6047.
- [27] G. Morrison, N. R. Spagnuolo, S. G. Karakalos, H.-C. Zurr Loyer, *Inorg. Chem.* **2019**, *58*, 8702–8709.
- [28] C. T. Palumbo, I. Zivkovic, R. Scopelliti, M. Mazzanti, *J. Am. Chem. Soc.* **2019**, *141*, 9827–9831.
- [29] N. T. Rice, I. A. Popov, D. R. Russo, J. Bacsá, E. R. Batista, P. Yang, J. Telser, H. S. La Pierre, *J. Am. Chem. Soc.* **2019**, *141*, 13222–13233.
- [30] A. R. Willauer, C. T. Palumbo, R. Scopelliti, I. Zivkovic, I. Douair, L. Maron, M. Mazzanti, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, *59*, 3549–3553.
- [31] A. R. Willauer, C. T. Palumbo, F. Fadaei-Tirani, I. Zivkovic, I. Douair, L. Maron, M. Mazzanti, *J. Am. Chem. Soc.* **2020**, *142*, 5538–5542.
- [32] N. T. Rice, I. A. Popov, D. R. Russo, T. P. Gompa, A. Ramanathan, J. Bacsá, E. R. Batista, P. Yang, H. S. La Pierre, *Chem. Sci.* **2020**, *11*, 6149–6159.
- [33] T. P. Gompa, A. Ramanathan, N. T. Rice, H. S. La Pierre, *Dalton Trans.* **2020**, *49*, 15945–15987.
- [34] A. R. Willauer, I. Douair, A.-S. Chauvin, F. Fadaei-Tirani, J.-C. G. Bünzli, L. Maron, M. Mazzanti, *Chem. Sci.* **2022**, *13*, 681–691.
- [35] N. T. Rice, I. A. Popov, R. K. Carlson, S. M. Greer, A. C. Boggiano, B. W. Stein, J. Bacsá, E. R. Batista, P. Yang, H. S. La Pierre, *Dalton Trans.* **2022**, *51*, 6696–6706.
- [36] A. C. Boggiano, S. R. Crowdhury, M. D. Roy, M. G. Bernbeck, S. M. Greer, B. Vlaisavljevich, H. S. La Pierre, *Angewandte Chemie Int. Ed.* **2024**, *63*, e202409789.
- [37] A. Ramanathan, J. Kaplan, D.-C. Sergentu, J. A. Branson, M. Ozerov, A. I. Kolesnikov, S. G. Minasian, J. Autschbach, J. W. Freeland, Z. Jiang, M. Mourigal, H. S. La Pierre, *Nat. Commun.* **2023**, *14*, 3134.
- [38] R. Hoppe, in *The Rare Earths in Modern Science and Technology: Volume 3* (Eds.: G. J. McCarthy, H. B. Silber, J. J. Rhyne, F. M. Kalina), Springer US, Boston, MA, **1982**, pp. 315–315.
- [39] Z. Hu, G. Kaindl, B. G. Müller, *J. Alloys Compd.* **1997**, *246*, 177–185.
- [40] T. Vent-Schmidt, Z. Fang, Z. Lee, D. Dixon, S. Riedel, *Chem. Eur. J.* **2016**, *22*, 2406–2416.
- [41] K.-J. Range, M. Stadler, F. Rau, U. Klement, *Angew. Chem. Int. Ed.* **1987**, *26*, 1174–1175.
- [42] A. M. Heyns, K.-J. Range, *J. Alloys Compd.* **1991**, *176*, L17–L21.
- [43] A. M. Heyns, K.-J. Range, *J. Raman Spectrosc.* **1994**, *25*, 855–859.
- [44] Y. Wang, M. Xu, L. Yang, B. Yan, Q. Qin, X. Shao, Y. Zhang, D. Huang, X. Lin, J. Lv, D. Zhang, H. Gou, H.-K. Mao, C. Chen, Y. Ma, *Nat. Commun.* **2020**, *11*, 4702.
- [45] A. Dewaele, N. Worth, C. J. Pickard, R. J. Needs, S. Pascarelli, O. Mathon, M. Mezouar, T. Irfune, *Nat. Chem.* **2016**, *8*, 784–790.
- [46] Q. Hu, D. Y. Kim, W. Yang, L. Yang, Y. Meng, L. Zhang, H.-K. Mao, *Nature* **2016**, *534*, 241–244.
- [47] S. S. Lobanov, Q. Zhu, N. Holtgrewe, C. Prescher, V. B. Prakapenka, A. R. Oganov, A. F. Goncharov, *Sci. Rep.* **2015**, *5*, 13582.
- [48] X. Zhang, X. Luo, M. Bykov, E. Bykova, I. Chuvashova, D. Butenko, S. Chariton, V. Prakapenka, D. Smith, H. Wang, Y. Wang, J. Lv, A. F. Goncharov, *Phys. Rev. B* **2021**, *103*, 094104.

- [49] A. Haberer, H. Huppertz, *Z. Anorg. Allg. Chem.* **2010**, *636*, 363–367.
- [50] J. R. Nelson, R. J. Needs, C. J. Pickard, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2015**, *17*, 6889–6895.
- [51] J. Cirera, E. Ruiz, S. Alvarez, *Organometallics* **2005**, *24*, 1556–1562.
- [52] R. D. Shannon, *Acta Crystallogr. Sect. A* **1976**, *32*, 751–767.
- [53] F. Birch, *Phys. Rev.* **1947**, *71*, 809.

Manuskript erhalten: 25. November 2024
Akzeptierte Fassung online: 3. Februar 2025
Endgültige Fassung online: 13. Februar 2025
