# 5 Symmetrie von Domänen in $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$

Die Symmetrie einzelner Domänen soll in dieser Arbeit mit CBED untersucht werden. In Abbildung 2.10 sind die für morphotropes PZT in Frage kommenden Strukturmodelle der Phasen $R3m$, $Cm$ und $P4mm$ dargestellt. Da alle drei unterschiedlichen Punktgruppen angehören, ist eine Unterscheidung der Punktgruppen $3m$, $m$ und $4mm$ ausreichend. Für diese zeigt Abbildung 5.1 die stereographischen Projektionen, aus denen ersichtlich ist, welche Zonenachsensymmetrien die verschiedenen pseudokubischen Richtungen[1] besitzen. Es sind nur die höchst symmetrischen Pole <100>, <110> und <111> eingezeichnet. Die für diese Richtungen auftretenden Symmetrien sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Spiegelebenen vom Typ {100} sind nur in der tetragonalen Struktur

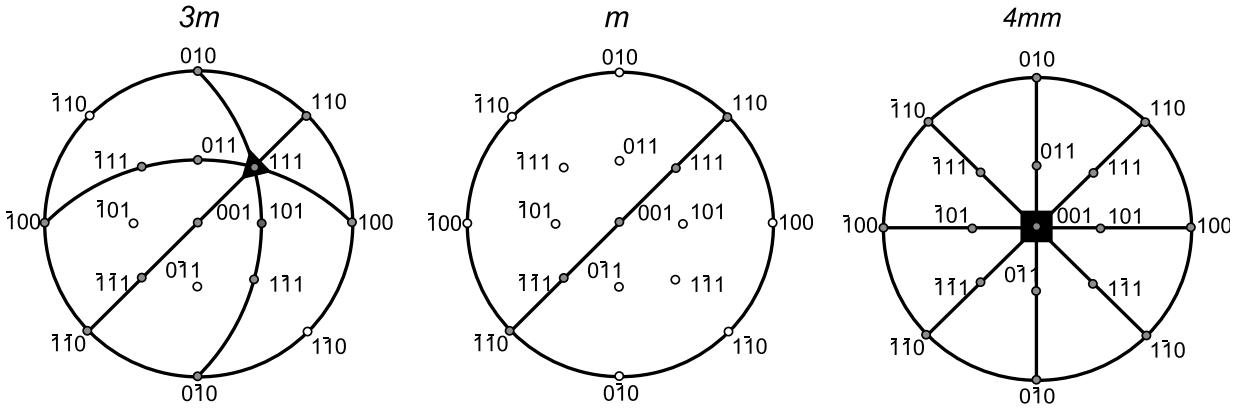


**Abbildung 5.1:** Symmetrieelemente für die drei Punktgruppen dargestellt in der stereographischen Projektion. Zonenachsen mit Symmetrie sind durch ausgefüllte Kreise markiert, Zonenachsen ohne Symmetrie durch leere Kreise.

| <$uvw$> | $3m$ | $m$ | $4mm$ |
|---|---|---|---|
| <100> | $m_{(\bar{1}10)}$ | 1 oder $m_{(\bar{1}10)}$ | $4mm$ oder $m_{(100)}$ |
| <110> | 1 oder $m_{(\bar{1}10)}$ | 1 oder $m_{(\bar{1}10)}$ | $m_{(\bar{1}10)}$ oder $m_{(100)}$ |
| <111> | $3m$ oder $m_{(\bar{1}10)}$ | 1 oder $m_{(\bar{1}10)}$ | $m_{(\bar{1}10)}$ |

**Tabelle 5.1:** Zonenachsensymmetrien der pseudokubischen <100>, <110> und <111> Richtungen für die drei Punktgruppen 3m, m und 4mm.

vorhanden. Damit ist die tetragonale Phase anhand dieser in <100>-Beugungsbildern

[1] Auch in diesem Kapitel sind die Richtungen und Ebenen pseudokubisch indiziert. Teilweise wurde eine monokline Indizierung gewählt, die dann aber durch ein tiefgestelltes $m$ gekennzeichnet ist.

eindeutig zu identifizieren. Die vierzählige Achse ist seltener zu finden. Diese ist nur für ac-Domänen in jeder zweiten Domäne parallel zum Strahl orientiert. In <110>-Beugungsbildern kann sowohl eine {100}- als auch eine {110}-Spiegelebene auftreten. Alle <111>-Zonenachsen besitzen ebenfalls eine Spiegelebene in {110}.
Da dies die gemeinsame Spiegelebene aller drei Strukturen ist, kann dies die Untersuchung weiterer benachbarter Domänen erfordern. So ist eine eindeutige Identifizierung rhomboedrischer Symmetrie nur anhand der dreizähligen Achse möglich. Diese ist, wie die vierzählige Achse, nur in Domänen mit geneigten Domänenwänden zu finden. Eine Unterscheidung von der monoklinen Symmetrie ist jedoch auch in <100>-Richtung möglich. Für rhomboedrische Symmetrie ist in allen <100>-Richtungen eine {110}-Spiegelebene zu beobachten. Für monokline Symmetrie ist dies nur für [001] der Fall. Für einige der im vorigen Kapitel vorgestellten Zwillingsoperationen für monokline Domänen bleibt jedoch die c-Richtung erhalten. Somit hängt es zudem von dieser Zwillingsoperation ab, ob die Zonenachsensymmetrie 1 in einer Domäne beobachtet werden kann. Das gleiche gilt für <111>-Zonenachsen. Nur die $<110>_m$-Zonenachsen[2] besitzen die Symmetrie m. Die Zonenachsensymmetrie der $<011>_m$-Richtungen ist 1.
Prinzipiell sollten als Schlussfolgerung dieser Überlegungen benachbarte Domänen untersucht werden, um die Symmetrien eindeutig nachzuweisen. Zudem führt dies zu einem Verständnis der vorliegenden Domänenkonfiguration. Anhand dieser können über die Gruppe-Untergruppe-Beziehungen Rückschlüsse auf Phasenübergänge gezogen werden. Im Folgenden werden für die Zusammensetzungen PZT 60/40 bis PZT 45/55 die beobachteten Symmetrien und Domänenkonfigurationen diskutiert.
Um sicher zu stellen, dass nur einzelne Domänen durchstrahlt werden, wurden die Domänen entsprechend ausgewählt. Dafür muss zwischen zwei benachbarten, auf die Bildebene projizierten Domänenwänden ein Bereich, der breiter als der verwendete Strahldurchmesser ist, verbleiben. Dies entspricht der Länge x in Abbildung 5.2 [38]. Mit der Domänenbreite y, der Probendicke z und dem Neigungswinkel $\phi \neq 90$ der Domänenwand aus der Strahlrichtung ist dies gegeben für:

$$\frac{y}{\cos\phi} - z \cdot \tan\rho > Strahldurchmesser \tag{5.1}$$

Dies ergibt bei einer Probendicke von 50 nm und um 45° geneigten Wänden und einem Strahldurchmesser von 12,5 nm eine notwendige Domänenbreite von 45 nm. Somit ist eine Untersuchung von Domänen mit geneigten Wänden, die für den Nachweis bestimmter Symmetrieelemente notwendig ist, nur für relativ breite Domänen möglich. Für parallel zum Strahl orientierte Domänenwände ist alleine der Strahldurchmesser der einschränkende Faktor. Die zur Dokumentation der Strahlposition aufgenommenen Doppelbelichtungsaufnahmen bestätigten den angegebenen Wert des Strahldurchmessers. Falls der Strahldurchmesser auf den Aufnahmen größer wirkt, ist dies durch eine zu lang gewählte Belichtungszeit bedingt. Sofern nicht gesondert erwähnt, wurde ein Durchmesser von 10 bzw. 12,5 nm verwendet.

[2] Das tiefgestellte *m* kennzeichnet die monokline Indizierung. Ansonsten wird die pseudokubische Indizierung verwendet.

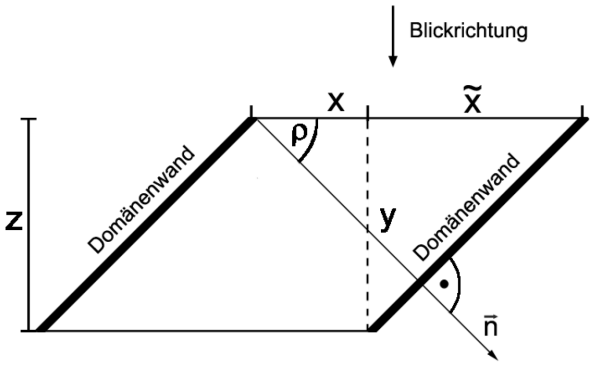


**Abbildung 5.2:** Geometrischer Zusammenhang zwischen Probendicke $z$, Domänenbreite $y$, Neigungswinkel $\phi$ der Domänenwand und der Breite $x$ des Bereichs, in dem eine Domäne einzeln durchstrahlbar bleibt [38].

## 5.1 PZT 60/40

PZT 60/40 ist die Probe mit dem höchsten Zr-Gehalt auf der rhomboedrischen Seite, die in dieser Arbeit untersucht wurde. Diese Zusammensetzung kann als rhomboedrische Referenzprobe der $R3m$ Phase betrachtet werden, da ab $x \leq 0,38$ PZT bei Zimmertemperatur in der $R3c$ Phase vorliegt [57]. Abbildung 5.3 zeigt eine Hellfeldabbildung einer Domänenkonfiguration in der Probe 60/40. Die Zonenachse wurde als [111] indiziert mit nach rechts weisendem $[\bar{1}10]$-Vektor. Dies erlaubt die Bestimmung der Orientierung der Domänenwände in einem übergeordneten Koordinatensystem. Die Orientierung der Domänenwände kann aus dem defokussierten Beugungsbild und dem Kontrast im Hellfeld bestimmt werden. Die Orientierung der Domänenwand zwischen 1 und 2 lässt sich am einfachsten bestimmen, da sie parallel zum Strahl (*edge on*) orientiert ist und in $[\bar{2}11]$-Richtung verläuft. Damit handelt es sich um eine $(0\bar{1}1)$-Ebene. Die Domänenwand zwischen Domäne 1 und 4 weist einen relativ breiten $\delta$-Streifenkontrast auf und verläuft in $[\bar{1}10]$ Richtung. Es handelt sich demnach um eine Domänenwand in der (110)-Ebene. Diese ist um 54° aus der Zonenachse geneigt, was den breiten $\delta$-Streifenkontrast erklärt. Der $\delta$-Streifen Kontrast zwischen 2 und 3 ist im Vergleich dazu schmäler. Eine Wand in der (001)-Ebene verläuft ebenso in $[\bar{1}10]$, ist aber nur um 35° gegenüber der Zonenachse geneigt. Die Domänenwand zwischen 3 und 4 zeigt einen ähnlich breiten Kontrast wie die Domänenwand zwischen 1 und 4. Somit sollte sie in der (011)-Ebene liegen.
Die möglichen Polarisationsrichtungen ergeben sich aus der Orientierung der Spiegelebenen in den konvergenten Beugungsbildern. Die Spiegelebene im Beugungsbild von Domäne 1 ist die $(\bar{1}10)$-Ebene. Mit der Domänenwand $1|2$ in $(0\bar{1}1)$ kommen nur $[11\bar{1}]$ oder $[\bar{1}\bar{1}1]$ in Frage. Die Polarisation von Domäne 2 ergibt sich entsprechend oder aus der Zwillingsoperation. Ohne den Vergleich mit Simulationen ist nur die Polarität unbestimmt. In Abbildung 5.3 ist eine Skizze mit einer der möglichen Anordnungen zu sehen. Die Domänenkonfiguration besteht aus {110}- und {100}-Wänden. Eine der Wände muss

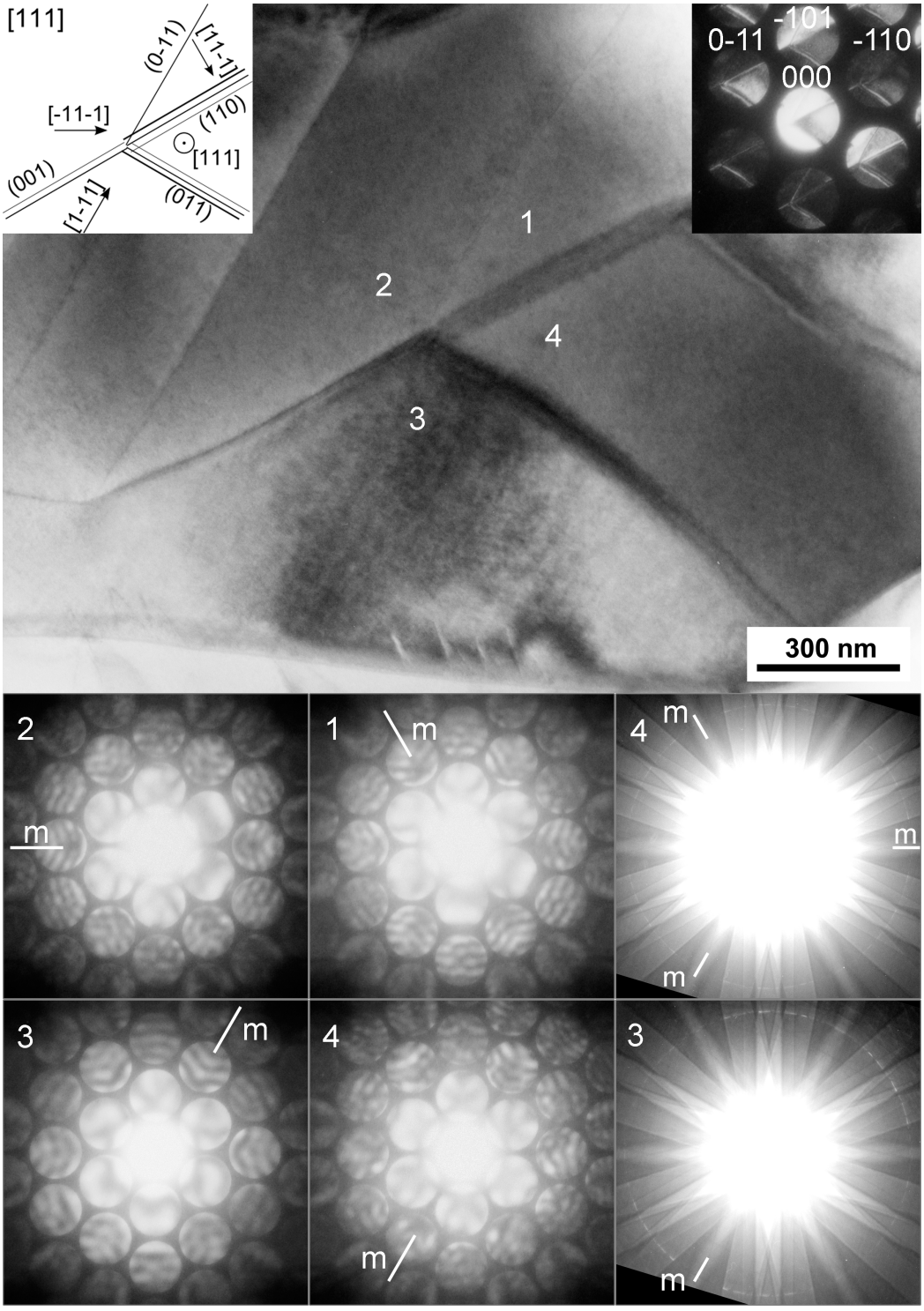


**Abbildung 5.3:** Domänenkonfiguration in PZT 60/40. Das Modell basiert auf den beobachteten Orientierungen der Domänenwände und der Spiegelebenen in den konvergenten Beugungsbildern. Die FOLZ-Intensität von 4 ist deutlich geringer als die von Domäne 3 und lässt die dreizählige nur schwer erkennen.

eine *head to head*- bzw. *tail to tail*-Wand sein. Gewählt wurde die Wand zwischen Domäne 2 und 3, da es sich um eine (001) Ebene handelt und somit die antiparallele Komponente möglichst klein ist[3]. Der Domänenkonfiguration folgend sollte die Polarisation in Domäne 4, die nur geneigte Domänenwände besitzt, parallel zur Zonenachse sein. Demnach sollte eine dreizählige Symmetrie im Beugungsbild zu beobachten sein. Die Symmetrie innerhalb der nullten Laue-Zone (ZOLZ) entspricht keiner dreizähligen Symmetrie und wirkt im Vergleich zu den anderen Domänen gestörter. Ein Vergleich der Intensitäten der ersten Laue Zonen (FOLZ) für alle vier Domänen zeigt jedoch einen deutlichen Unterschied für Domäne 4. Die Symmetrie ist dreizählig, jedoch sind die Intensitäten der ersten Laue Zone für Domäne 4 deutlich geringer als für Domäne 3. Innerhalb der FOLZ von Domäne 3 sind die Spiegelebene und die Polare Achse gut zu erkennen. Reflexe mit Beugungsvektoren parallel zur Spiegelebene besitzen mehr Intensität als Reflexe mit Beugungsvektoren senkrecht zur Spiegelebene. In Abbildung 5.3 ist die Zonenachse von Domäne 3 eingestellt und ein Kontrast innerhalb der Domäne zu erkennen. Am stärksten ausgeprägt ist dieser Kontrast in $[0\bar{1}1]$ Richtung senkrecht zu der beobachteten Spiegelebene in dieser Domäne.
Die dreizählige Symmetrie konnte an einer anderen Probe, mit zusätzlich zum *zone axis pattern* (ZAP) aufgenommenen Dunkelfeldbeugungsbildern (DPs), deutlicher nachgewiesen werden. In Abbildung 5.4 sind ZAP und DPs von zwei benachbarten Domänen zu sehen. Die Bilder sind folgendermaßen aufgeteilt: Zentriert in der Mitte ist die nullte Laue Zone (ZOLZ) des ZAPs zu sehen. Dies wird im folgenden *projected whole pattern* (*proj. WP*) genannt. Um das *proj WP* herum, in Richtung des Beugungsvektors, sind die DPs mit den Reflexen in Bragg-Bedingung angeordnet. Den Hintergrund bildet das *Whole Pattern* (WP) mit der ersten Laue Zone in Negativ Darstellung. Wieder ist die FOLZ-Intensität für die dreizählige Achse geringer. Durch Bildnachbearbeitung konnten die drei Spiegelebenen im WP verdeutlicht werden. Die Spiegelebenen konnten durch DPs mit den drei entsprechenden Strahlverkippungen bestätigt werden. Alle drei Dunkelfeldscheiben besitzen eine ähnliche Intensitätsverteilung. Die Spiegelsymmetrie ist in allen erkennbar, auch wenn geringe Abweichungen existieren. Die dreizählige Symmetrie ist allein aus dem *proj. WP* schwer zu erkennen. Dabei ist die Einstrahlrichtung exakt justiert. Dies ist an der Intensitätsverteilung innerhalb der Primärstrahlscheibe zu erkennen. Die vertikale Spiegelebene von Domäne 2 ist deutlicher zu erkennen. Auch für diese Domäne besitzen FOLZ-Reflexe mit Beugungsvektor senkrecht zur Spiegelebene eine deutlich geringere Intensität als die Reflexe, deren Beugungsvektoren annähernd parallel zur Spiegelebene liegen.
Diese beiden Domänen wurden noch ein weiteres Mal im JEOL 2010 FEF [111], ausgestattet mit einer Feldemissionskathode (FEG) und einem Ω-Energiefilter, untersucht. Der Strahldurchmesser wurde dabei auf 1 nm eingestellt, und mit Hilfe des Energiefilters wurde der Plasmonenpeak aus dem Spektrum eliminiert. Dadurch wird der Untergrund stark reduziert (vgl. Abbildung 5.5). So sind mehr Reflexe in der nullten Laue Zone

[3] In *head to head*-Anordnung beträgt der Winkel zwischen den Polarisationen 71°.

im Vergleich zur Aufnahme ohne Energiefilter zu erkennen. Auch die erste Laue Zone zeichnet sich deutlicher vom Untergrund ab, und innerhalb der FOLZ-Reflexe zeichnen sich Details ab. Dies ist möglicherweise ein Grund, warum im Vergleich zur Aufnahme mit $LaB_6$-Kathode und einem Strahldurchmesser von 10 nm ein deutlicherer Symmetriebruch beobachtet wurde. Eine andere mögliche Ursache ist das deutlich kleinere untersuchte Probenvolumen. Dieses verringert sich durch die Reduzierung des Strahldurchmessers auf 1 nm auf ein Hundertstel des Volumens, das mit einem Strahldurchmesser von 10 nm durchstrahlt wird. Die Theorien von Glazer *et al.* [62] und von Grinberg *et al.* [100], nach denen die rhomboedrische Symmetrie nur der mittleren Symmetrie entspricht, können diese Beobachtung erklären. Ein einfaches Modell zur Entstehung der mittleren Symmetrie in Beugungsbildern zeigt Abbildung C.1 im Anhang. Zwei Bilder wurden übereinandergelegt und das obere um 90° gedreht bzw. an $(\bar{1}01)$ gespiegelt und mit einer Transparenz versehen. Für eine Transparenz von 50 % ist im resultierenden Bild die mittlere Symmetrie zu sehen, nicht aber die Symmetrie der einzelnen Bilder. Die mittlere Symmetrie entspricht der Transformation, die auf das Bild angewandt wurde.
Während des Mikrokopierens veränderte sich das Beugungsbild ohne eine Veränderung der Einstellungen des Mikroskops. Dies könnte durch leichte Schwankungen in der Strahlposition hervorgerufen werden. Bei dem kleinen Strahldurchmesser von einem Nanometer, kann sich das durchstrahlte Volumen dadurch stark ändern. Somit würden sich auch die Phasenanteile der Nanodomänen ändern, was zu den beobachteten Fluktuationen in der Intensitätsverteilung führen kann. Letztendlich kann eine Probenschädigung unter dem intensiveren Strahl der FEG nicht vollständig ausgeschlossen werden. In der Abbildung waren, im Anschluß an die konvergente Beugung, an den untersuchten Positionen keine Auffälligkeiten zu beobachten.

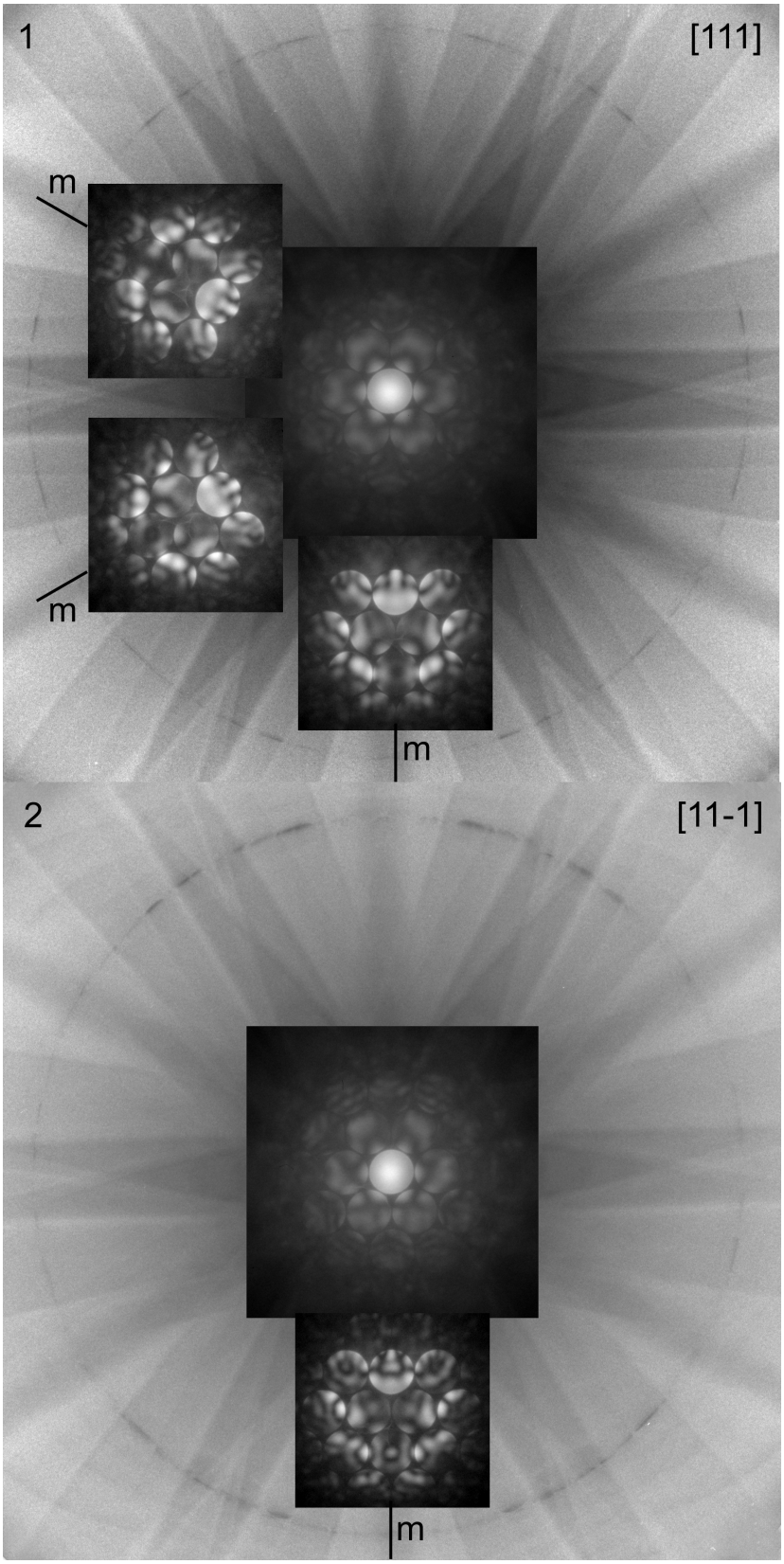


**Abbildung 5.4:** <111>-Beugungsbilder, aufgenommen mit einem Strahldurchmesser von 10 nm, zweier benachbarter Domänen in PZT 60/40 zeigen die Zonenachsensymmetrien $3m$ (1) und $m$ (2). Die $\{11\bar{2}\}$-DPs sind entsprechend ihres Beugungsvektors angeordnet.

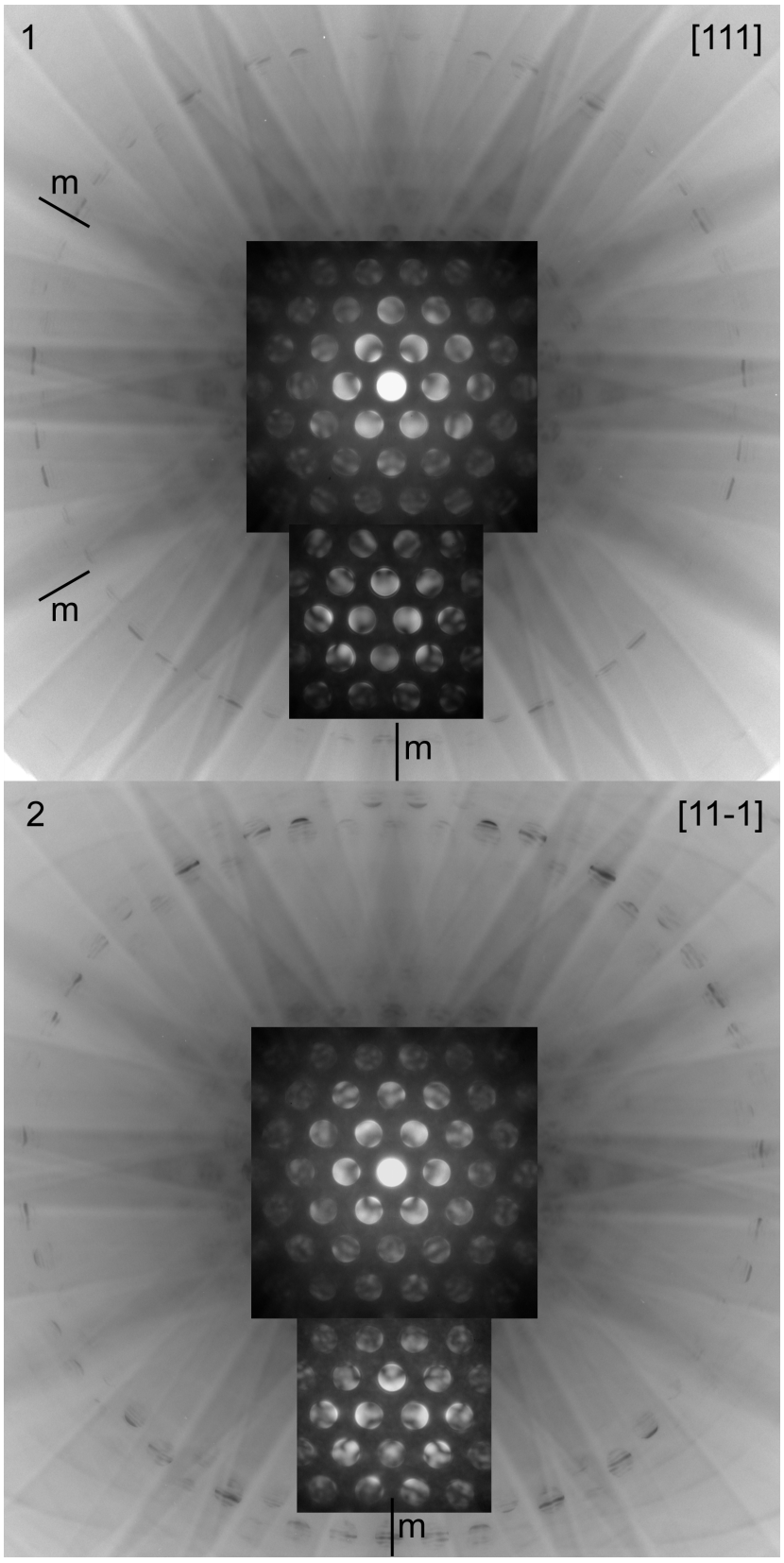


**Abbildung 5.5:** Bei Verwendung eines Strahldurchmessers von 1 nm und eines Energiefilters zeigen die Beugungsbilder der selben Domänen wie in Abbildung 5.4 deutlichere Abweichung von den Symmetrien $3m$ und $m$.

### 5.1.1 Korngrenze

Für die Probe PZT 60/40 wurde eine Korngrenze beobachtet, bei der beide Körner eine gemeinsame Zonenachse in [111] besitzen. Damit kann diese als eine Kippkorngrenze beschrieben werden. In dem über die Korngrenze hinweg aufgenommenen Beugungsbild (Abb. 5.6 (a)) ist zu sehen, dass die $\bar{1}\bar{2}3$-Reflexe beider Körner zusammenfallen. Damit besteht ein Koinzidenzgitter in der Korngrenze. Dieses Koinzidenzgitter erzeugt

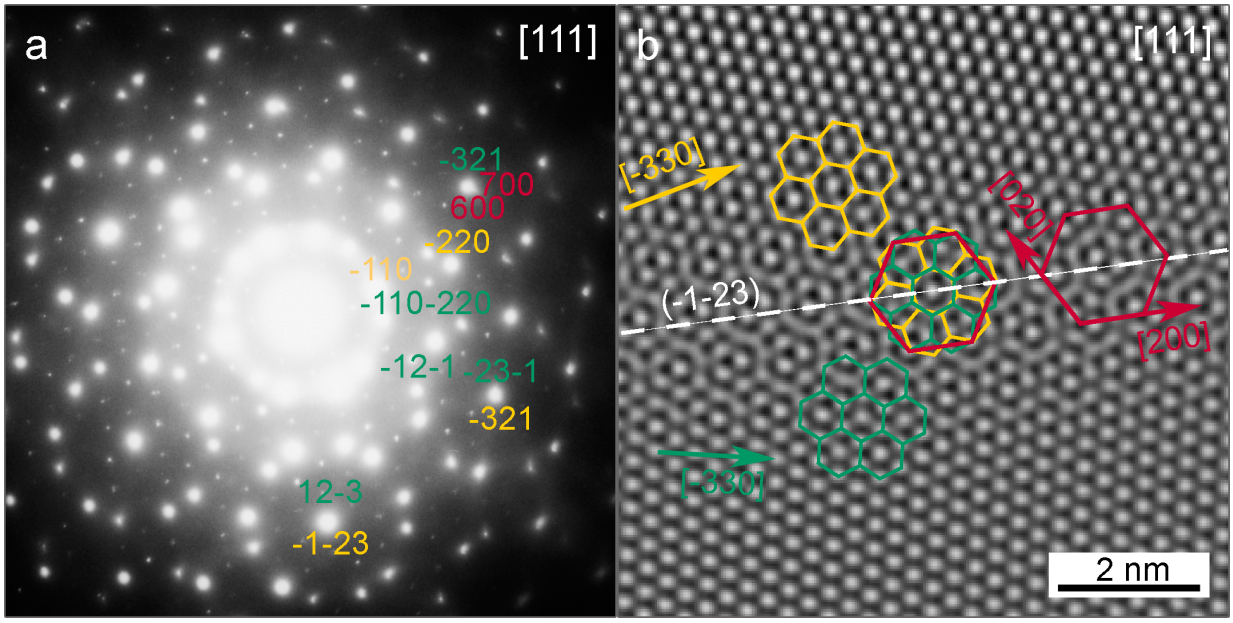


**Abbildung 5.6:** $\sum 7$ Korngrenze in PZT 60/40. (a) Die $\{\bar{1}\bar{2}3\}$-Reflexe beider Körner fallen zusammen. Zusätzlich sind Überstrukturreflexe vom Typ $\frac{1}{7}\{\bar{1}\bar{2}3\}$ zu beobachten. (b) Das Koinzidenzgitter (rot) ergibt sich aus der Überlagerung der beiden Gitter. Der gemessene Winkel zwischen $[\bar{1}10]$ in beiden Körnern (grün und gelb) beträgt 22,8°.

auch Überstrukturreflexe im Beugungsbild.
In Abbildung 5.6 (b) ist das hochauflösende TEM-Bild der Korngrenze zu sehen. Für beide Körner ist das Gitter in Form von zentrierten Sechsecken eingezeichnet. Das Gitter von Korn 2 (gelb) ist gegenüber dem von Korn 1 (grün) um 22,8° um die Zonenachse [111] verdreht. Eine Überlagerung von beiden Gittern ergibt das Koinzidenzgitter, das sieben primitive Zellen enthält. Der Index des Koinzidenzgitters ist damit 7, da einer von 7 Gitterpunkten erhalten bleibt [118]. Die Basisvektoren des (ebenen) Koinzidenzgitters sind ebenfalls Abbildung 5.6 (b) zu entnehmen. Diese sind $[\bar{1}10]+\frac{1}{3}[\bar{2}11]=\frac{1}{3}[\bar{5}41]$ und $[0\bar{1}1]+\frac{1}{3}[1\bar{2}1]=\frac{1}{3}[1\bar{5}4]$. Mit diesem Gitter lassen sich die im Beugungsbild (Abb. 5.6 (a)) sichtbaren Überstrukturreflexe vom Typ $\frac{1}{7}\{\bar{1}\bar{2}3\}$ erklären. Die gemeinsamen Reflexe beider Körner sind 700-Reflexe des Koinzidenzgitters.
Die Korngrenze liegt in Abbildung 5.6 (b) ebenfalls nahezu in der $(\bar{1}\bar{2}3)$-Ebene, die die Winkelhalbierende zwischen den $[\bar{1}10]$-Richtungen in beiden Körnern darstellt. Somit

lässt sich die Beziehung beider Körner auch über eine Spiegelung an dieser Ebene beschreiben. Dies ergibt einen Winkel von 21,8°, in aktzeptabler Übereinstimmung mit dem gemessenen Wert.
In der Nähe der Korngrenze sind Zig-Zag Domänen zu beobachten (vgl. Abbildung 5.7 (a)). Aufgrund der Form der Domänen müssen die Domänenwände in von {110} abwei-

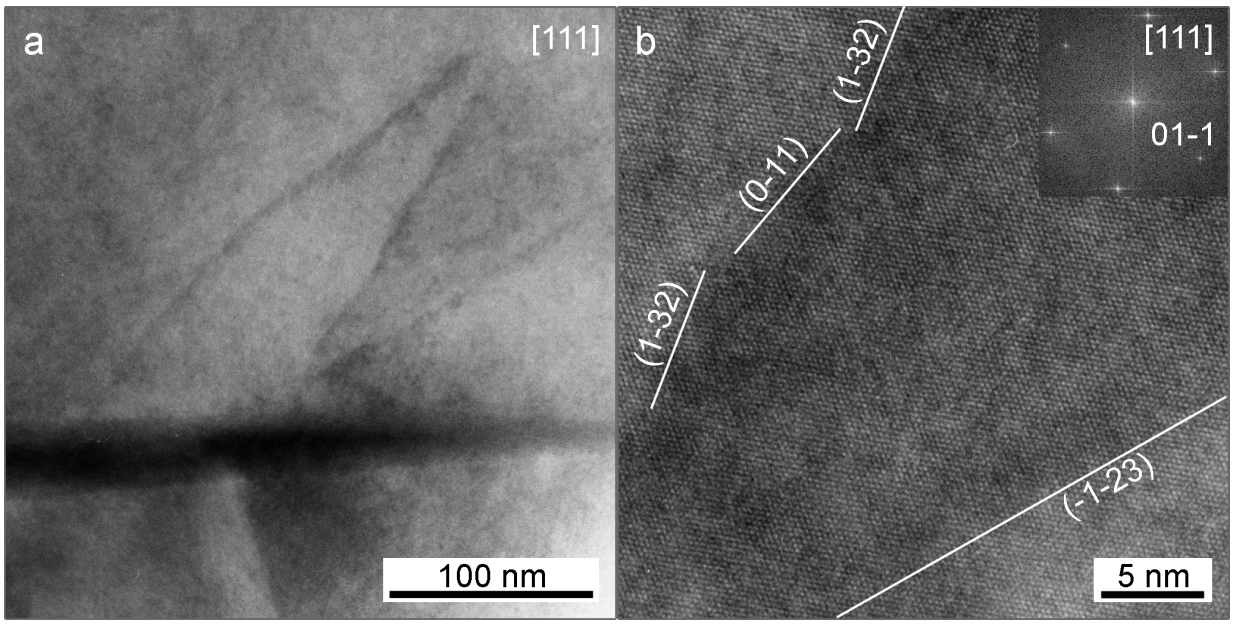


**Abbildung 5.7:** (a) In der direkten Umgebung der Korngrenze sind Zig-Zag Domänen zu beobachten. Die Mittellinie dieser Domänen verläuft in etwa parallel zur $(0\bar{1}1)$-Ebene. Die Domänenwände selbst weichen von dieser Richtung ab, sind aber parallel zum Strahl in [111]. In der hochauflösenden Aufnahme (b) kann man den Wänden $(\bar{1}\bar{2}3)$- und $(1\bar{3}2)$-Ebenen zuordnen, wobei in manchen Bereichen die Domänenwand in der $(0\bar{1}1)$-Ebene liegt.

chenden Ebenen liegen. Die Mittellinie der Domänen verläuft jedoch nahezu parallel zu $(0\bar{1}1)$. In der hochauflösenden Aufnahme (Abb. 5.7 (b)) ist zu erkennen, dass die Domänenwände in großen Bereichen in $(1\bar{3}2)$- und $(\bar{1}\bar{2}3)$-Ebenen liegen. Dies ist auch die Kontaktfläche der Kippwinkelkorngrenze und scheint für rhomboedrisches PZT eine günstige Ebene für Grenzflächen darzustellen. So können die Zig-Zag-Domänen mit dem Modell von Randall *et al.* [66] zur Vermeidung von *head to head*-Domänenwänden erklärt werden. Die Zig-Zag-Domänen vermeiden in diesem Fall eine *head to head*-Domänenwand in (100). Die Abweichung der Domänenwände von der idealen Zwillingsebene in $(0\bar{1}1)$ ist für die $(1\bar{3}2)$- und $(\bar{1}\bar{2}3)$-Ebenen gering. Dies ist in Abbildung 5.8 skizziert. Bereiche, in denen die Domänenwand in $(0\bar{1}1)$ liegt, sind in der Hochauflösung ebenfalls erkennbar.

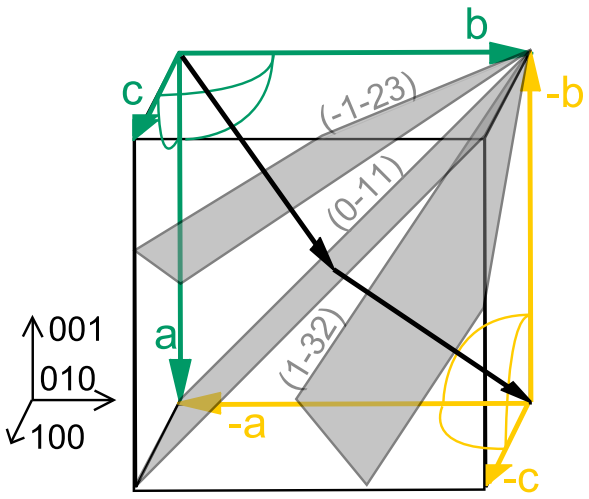


**Abbildung 5.8:** Schematische Darstellung der $\{12\bar{3}\}$-Ebenen als Abweichung von der $(0\bar{1}1)$-Ebene.

## 5.2 PZT 57,5/42,5

Für diese Zusammensetzung wurden entlang <100> $\{\bar{1}10\}$-Spiegelebenen entsprechend rhomboedrischer Symmetrie beobachtet. Die Domänenkonfiguration ist ungeordneter im Vergleich zur Probe PZT 60/40. Es treten vermehrt Domänenwände auf, deren Orientierung von den Zwillingsebenen abweicht. Auch ein starker Kontrast innerhalb der Domänen ist zu beobachten.

## 5.3 PZT 56/44

Die Untersuchungen an der Probe PZT 56/44 wurden entlang von <100>-Zonenachsen durchgeführt. In den meisten Domänen konnte eine {110}-Spiegelebene nachgewiesen werden, wie es rhomboedrischer Symmetrie entspricht. Die Domänen sind oft keilförmig und enden in einer oder mehreren Spitzen. Die Orientierung der Domänenwände weicht somit häufig von der idealen Orientierung in {110}- bzw. {100}-Ebenen ab. Dies wurde bereits von Ricote *et al.* als charakteristisch für rhomboedrisches PZT beschrieben, allerdings für die *R*3*c* Phase. Eine ähnliche Beobachtung ist in Abbildung 5.9 zu sehen. Die Domänen mit hellem Kontrast enden in mehreren Spitzen vor der Korngrenze am rechten Bildrand. Die Domänenwände verlaufen nur annähernd horizontal in [100]-Richtung. Trotzdem sind sie anhand der $\delta$-Streifen als geneigte {110}-Wände zu identifizieren. Die konvergenten Beugungsbilder beider Domänen zeigen eine {110}-Spiegelebene. Diese beiden Spiegelebenen sind um 90° gegeneinander verdreht. Diese Beobachtung ist nur für rhomboedrische 71°-Domänen möglich. Die monokline c-Achse müsste durch die Zwillingsoperation der geneigten Domänenwand in einer der beiden Domänen senkrecht zur Zonenachse orientiert sein. Für diese Domäne wäre nur die Zo-

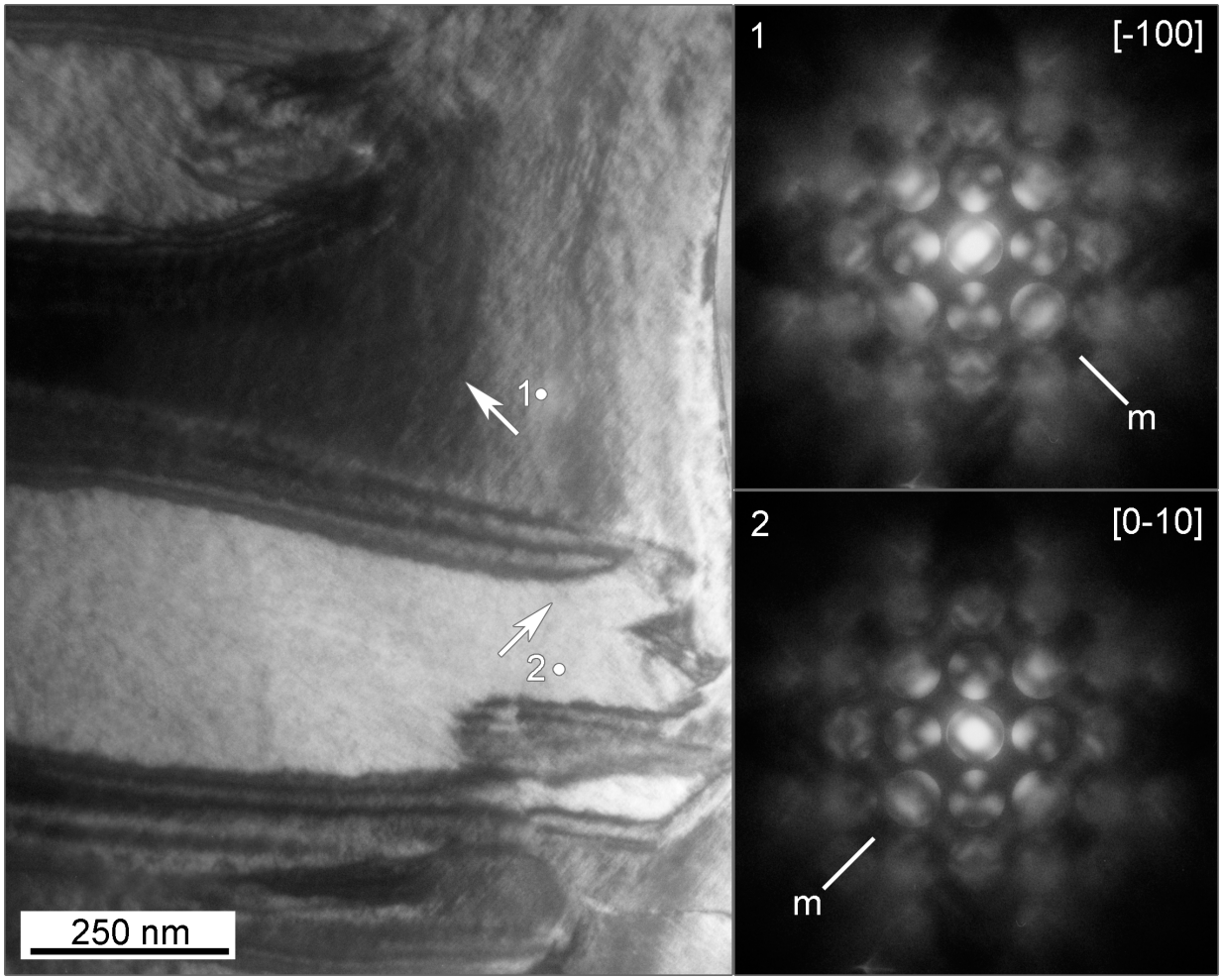


**Abbildung 5.9:** 71°-Domänenwand in der Probe PZT 56/44. Die geneigte Domänenwand zeigt deutliche $\delta$-Streifen und verläuft nahezu horizontal in [100]-Richtung. In beiden Domänen ist eine {110}-Spiegelebene zu beobachten, deren Orientierung sich um 90° ändert.

nenachsensymmetrie 1 zu beobachten. Da beide Beugungsbilder bei fast identischer Probendicke aufgenommen wurden, lässt sich an der Intensitätsverteilung auch die *head to tail* Anordnung gut erkennen. Aufgrund der Probendicke stimmt die Symmetrie innerhalb der Primärstrahlscheibe mit der Zonenachsensymmetrie überein.
Zusätzlich zum hell/dunkel Kontrast beider Domänen, fällt in der Abbildung noch ein streifenförmiger Kontrast innerhalb der Domänen auf. Dieser wechselt ebenso wie die Spiegelebene die Orientierung zwischen Domäne 1 und 2. Der Kontrast verläuft jedoch senkrecht zur Spiegelebene. Dieser Kontrast kann mit dem Modell von [111]-Rotationszwillingen in 71°-Mikrodomänen erklärt werden (vgl. Abb. 4.9 (c)). Für {110}-Nanodomänenwände sollte der Kontrast parallel zur Spiegelebene verlaufen (vgl. Abb. 4.9 (a)).