

**ZE: IFW Dresden**

**Förderkennzeichen: 01 DJ13009**

**Vorhabenbezeichnung: Kontrolle supraleitender Wirbeldynamik in Nb rolled-up-Nanostrukturen**

**Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2013-31.03.2016**

**Schlüsselwörter:** Nanotechnologie, supraleitende Nanostrukturen, Abrikosov Wirbel, Wirbeldynamik, numerische Simulationen.

## **I. Kurzdarstellung**

### **Ursprüngliches Arbeitsvorhaben**

Das Ziel des Projektes war die Bündelung der Kompetenzen zweier Forschungsgruppen zur Untersuchung der Wirbeldynamik supraleitender Mikro- und Nanostrukturen und dem Finden von Parametern für die Beschreibung dieser Dynamiken. Das Ziel unseres Projektes wurde durch die jüngsten Erfolge in der Nanotechnologie inspiriert, wobei mögliche Kombinationen zwischen reduzierter Dimensionalität und geometrischer Strukturierung nachgewiesen wurde.

### **Projektübersicht und implementierte Aufgaben (Analyse der Erfüllung des ursprünglich genehmigten Arbeitsvorhabens)**

1. Basierend auf der zeitabhängigen Ginzburg-Landau-Gleichung wurde ein mathematisches Modell der Wirbeldynamik in einer supraleitenden offenen Röhre entwickelt, getestet und angepasst.
2. Spezifikation von Steuerparametern der Wirbeldynamik in der Röhre.
  - a) Die Wirbeldynamik wurde für verschiedene Werte des Transportstroms, des Magnetfelds, der Länge und der Radien der offenen Röhre unter Berücksichtigung der Pinning-Zentren-Verteilung und des Eindringens des elektrischen Feldes berechnet.
  - b) Ein grundlegendes Programm für Hochleistungsrechnen (High Performance Computing, HPC) wurde entwickelt, das eine schnelle Analyse des Einflusses der Faktoren auf die Wirbeldynamik, die unter Punkt a) beschrieben wurden, umfasst.
3. Die Regelparameter wurden mit dem experimentell möglichen Bereich abgestimmt. Der Vergleich mit den experimentellen Daten hat dazu beigetragen, das mathematische Modell zu überprüfen und den Grad der Bedeutung relevanter Parameter zu etablieren.
4. Die Software für die Simulation der Wirbeldynamik in den aufgerollten Nanostrukturen wurden entwickelt. Mittels der gewonnenen Ergebnisse wird eine wirksame Kontrolle über die Wirbeldynamik für Fluxtronics möglich.
5. Eine nichtmonotone Abhängigkeit der Zeitdauer von der Wirbelbewegung  $\Delta t_1$  auf einer zylindrischen Röhre als Funktion des Magnetfelds wurde festgestellt.

6. Es wurde gezeigt, dass das Magnetfeld im supraleitenden Zylinder mit Abmessungen im Bereich der Kohärenzlänge um etwa 20% reduziert wird (der Effekt der Renormierung). Diese Änderung ist geringer als die im makroskopischen Fall (die vollständige Verdrängung des Magnetfeldes), aber höher als die in Zylindern mit einer infinitesimal dünnen Wand (keine Verdrängung des Magnetfeldes).

7. Es wurde demonstriert, dass der inhomogene Transportstrom zu einer steuerbaren Verzweigung der Wirbelbildungsperiode führt. Der detaillierte Mechanismus dieser Verzweigung wurde mit der zeitabhängigen Ginzburg-Landau-Gleichung analysiert. Die durchschnittliche Anzahl von Wirbeln, die im Zylinder je Nanosekunde auftreten, kann mit einem inhomogenen Transportstrom effektiv reduziert werden. Dies ist wichtig für die Verringerung des Rauschens und der Energiedissipation bei der Anwendung der Supraleiter, z. B. für die Erweiterung des Arbeitsbereiches der Supraleitersensoren zu niedrigeren Frequenzen.

8. Eine Erwärmung von dünnen Supraleitern durch die Wirbelbewegung wurde untersucht. Es wurde gezeigt, dass bei geringen Magnetfeldern (das spärliche Regime der Wirbeldynamik) die Temperaturerhöhung im Bereich von rund  $10^{-3}$  K liegt. Dieser Wert erscheint zu klein um einen Übergang zur normalen Phase zu induzieren. Wenn sich das Magnetfeld jedoch dem zweiten kritischen Wert nähert, steigt die Temperatur um etwa 1 K, was ausreichen könnte um die supraleitende Phase zu zerstören.

## **Erreichte Ziele**

In der **ersten Phase** des Projekts haben wir die Literatur analysiert und das mathematische Modell auf Basis der Ginzburg-Landau-Theorie erstellt, weil sie perfekt die supraleitenden Phänomene im Mikromaßstab beschreibt und korrekt die Randbedingungen und die Abhängigkeit des Ordnungsparameters von der Zeit berücksichtigt. Unser Hauptargument für die Ginzburg-Landau-Theorie war die Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen, wie zuvor von vielen Forschern überprüft worden war. Weiter haben wir eine numerische Realisierung des mathematischen Modells durchgeführt und den Einfluss verschiedener Parameter auf die Wirbeldynamik studiert. Dabei lag der Schwerpunkt der Untersuchung auf den Pinning-Zentren.

Die **zweite Phase** des Projekts vertiefte die Studie der Eigenschaften von supraleitenden Nanostrukturen einer gekrümmten geometrischen Form. Insbesondere haben wir die Wirbeldynamik in der offenen Röhre in einem Magnetfeld untersucht, welches eine Größenordnung höher ist als das Magnetfeld, bei dem die Dynamik beginnt. Wir haben festgestellt, dass eine der charakteristischen Zeiten der Dynamik (die Dauer einer Wirbelbewegung entlang der Röhre) ein nicht-triviales Verhalten zeigt: es gibt einen monotonen Teil und einen nicht-monotonen Teil.

Im **dritten Jahr** des Projekts haben wir uns auf die detaillierte Analyse der drei experimentell relevanten Phänomene konzentriert: den Einfluss der Inhomogenität des Transportstroms, die durch die Wirbelbewegung induzierten thermischen Effekte und die Wechselwirkung des externen Magnetfelds mit dem durch den supraleitenden Strom induzierten Magnetfeld. Wir haben gezeigt, wie die Dissipation der Energie in rohrförmigen Strukturen verringert werden

kann, indem man die entsprechende Anordnung der Elektroden wählt. Die thermischen Effekte im spärlichen Regime führen zu keiner nennenswerten Temperaturerhöhung, jedoch die kollektive Wirbelbewegung (Anzahl von etwa 1000) könnte eine Materialerwärmung verursachen, die die supraleitende Phase zerstört.

Während der Durchführung dieses Projekts wurden alle geplanten wissenschaftlichen Ziele erreicht. Dieses Projekt fördert die Zukunftsperspektive durch multidisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Forschern aus Deutschland und der Russischen Föderation. Die etablierten Kontakte von Wissenschaftlern aus der Russischen Föderation und dem IFW Dresden werden im Rahmen zukünftiger Projekte (z. B., DFG – RFFI) fortgeführt.

Ein weiteres Ziel des Projekts war es, junge Wissenschaftler in die Forschung an der Schnittstelle verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen einzubeziehen und Nachwuchsforschern aus der Russischen Föderation die leistungsfähige Forschungsinfrastruktur des IFW Dresden auf dem Gebiet der Nanotechnologie zur Verfügung zu stellen. Auch dieses Ziel wurde erfolgreich umgesetzt. Darüber hinaus wurde eine Reihe von gegenseitigen Besuchen von Mitarbeitern der beteiligten Forschungseinrichtungen organisiert und durchgeführt, um die gemeinsame Zusammenarbeit zu koordinieren und zu stärken.

### **Elemente, die im Vergleich zu dem ursprünglich genehmigten Arbeitsvorhaben hinzugefügt wurden**

In der zweiten und dritten Phase haben wir unsere theoretische Analyse der Wirbeldynamik auf Nanostrukturen im Zusammenhang mit den experimentellen Entwicklungen erweitert.

Alle Arbeiten wurden in Übereinstimmung mit der ursprünglichen Kosten- und Zeitplanung des Projekts umgesetzt.

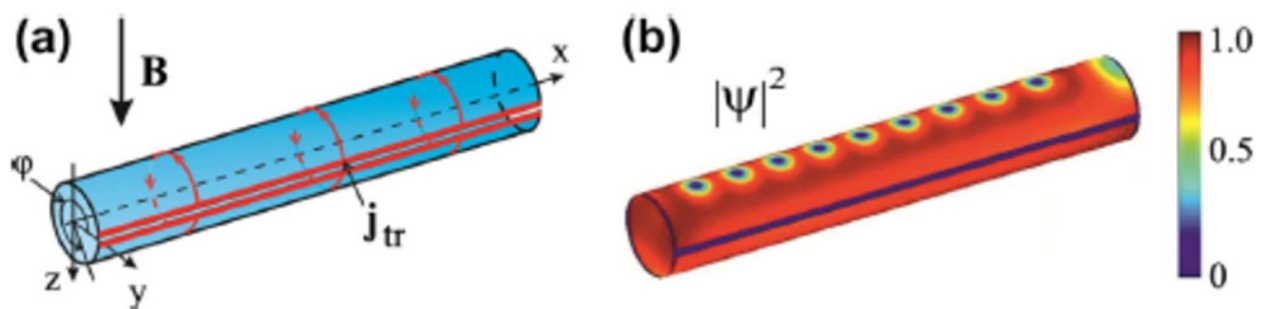
## II. Eingehende Darstellung

### Ergebnisse der 1. Phase

In der ersten Phase (01.04.2013-31.03.2014) wurde das mathematische Modell der Wirbeldynamik wie geplant entwickelt und erprobt.

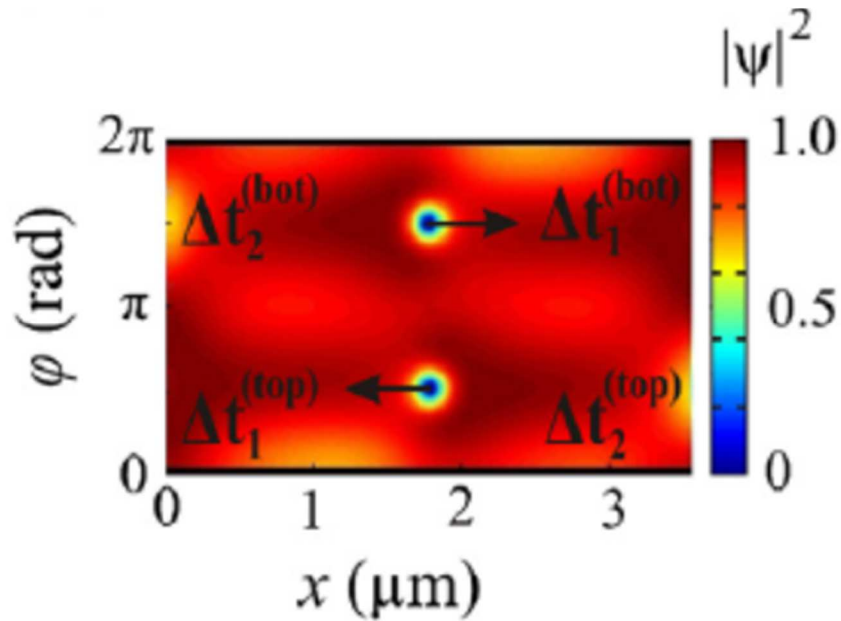
Unsere spezifischen Ziele waren: (1) Analyse der Literatur, (2) Begründung des auf dem Ginzburg-Landau-Ansatz basierenden mathematischen Modells, (3) numerische Realisierung des mathematischen Modells und (4) Untersuchung des Einflusses verschiedener Parameter auf die Wirbeldynamik. Im ersten Jahr haben wir die Untersuchungen im Wesentlichen auf die Pinning-Zentren konzentriert.

Wir haben die Literatur analysiert und den Ginzburg-Landau-Ansatz als Grundlage verwendet, weil er exakt die supraleitenden Phänomene in Mikrostrukturen beschreibt und vollständig die Randbedingungen und die Zeitabhängigkeit des Ordnungsparameters berücksichtigt. Unser Hauptargument für den Ginzburg-Landau-Ansatz ist die von vielen Forschern festgestellte Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen. Die allgemeine Ansicht des diskutierten Systems ist in Abb. 1 präsentiert, wobei die relative Positionierung des Magnetfeldes, der Röhre und der Elektroden gezeigt wird. Die x-Achse ist die Längsachse des zylindrischen Koordinatensystems (Abb. 1a). Die Verteilung des Amplitudenquadrats des Ordnungsparameters  $|\psi|^2$  ist in Abb. 1b dargestellt. Am oberen Halbzylinder entstehen Wirbelkeime am rechten Rand, dann bewegen sich die Wirbel entgegen der x-Achse und verschwinden am linken Rand. Am unteren Halbzylinder ist die entgegengesetzte Wirbeldynamik zu beobachten.



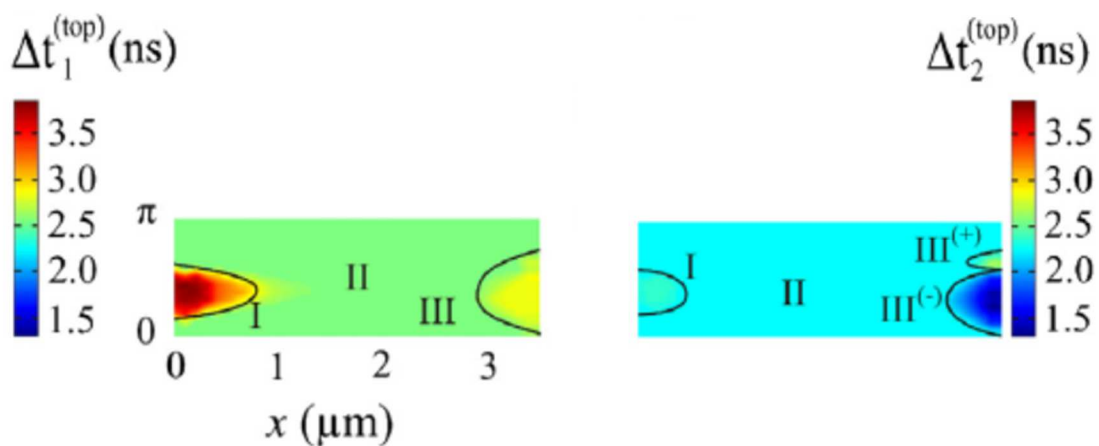
**Abb. 1.** Schematische Darstellung einer offenen Röhre [1]. Die Elektroden sind durch die dicken roten Linien angezeigt (a). Beispielhafte Wirbelverteilung (b).

Während des ersten Jahres haben wir das mathematische Modell unter Berücksichtigung der Krümmung der Röhre und der Wirkung der Pinning-Zentren durch die räumliche Variation des Ginzburg-Landau-Parameters entwickelt. Diese Methode sagt die anziehende (abstoßende) Wirkung von Pinning-Zentren auf Wirbel vorher. Die Größe der Wirkung hängt von der Stärke des Pinning-Zentrums ab.



**Abb. 2.** Verteilung des Ordnungsparameters mit der Notation für die charakteristischen Zeiten [1].

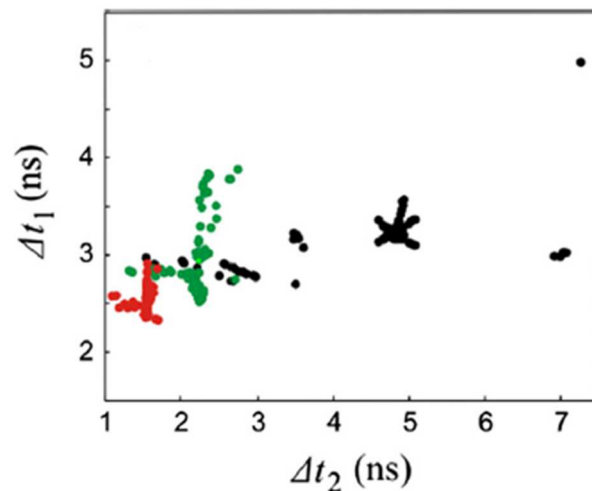
Die Wirbeldynamik wird durch zwei *charakteristische Zeiten* beschrieben (siehe Abb. 2): die Zeit der Keimbildung von Wirbeln an einem Rand der Röhre  $\Delta t_2$  und die Dauer der Bewegung eines Wirbels entlang der Röhre  $\Delta t_1$ . Unsere Simulation zeigt, dass die beiden charakteristischen Zeiten sich bis zu einem Faktor zwei bei Anwesenheit der Pinning-Zentren ändern können (siehe Abb. 3). Unterschiedliche Regime der Wirbeldynamik werden durch die Positionen der Pinning-Zentren, den Röhrenradius und den Transportstrom orthogonal zu der Röhrenachse gesteuert. Wir haben theoretisch gezeigt, wie man den Schwellenwert der Transportstromdichte (für die Entstehung der Wirbeldynamik) und das Übergangsmagnetfeld (für den Übergang zwischen dem spärlichen Regime der Wirbeldynamik und dem Vielwirbel-Regime) effizient kontrollieren kann.



**Abb. 3.** Charakteristische Zeiten aufgetragen auf der Evolvente der Röhre [1]. Beide Panels stellen  $\Delta t_{1,2}^{(top)}$  als Funktion von der Position eines Pinning-Zentrums auf der Oberseite dar. Für die Bereiche I und III, ist der Einfluss des Pinning-Zentrums auf die Wirbeldynamik maximal.

Die Wirbeldynamik beginnt, wenn ein bestimmter Schwellenwert der Transportstromdichte in einem festen Magnetfeld erreicht wird. Weiter haben wir die Kontrolle des Schwellwertes der Transportstromdichte untersucht. Z. B., ergibt die Berechnung einen Schwellwert der Transportstromdichte von  $11,14 \times 10^9 \text{ Am}^{-2}$  für Röhren mit einem Radius  $R = 500 \text{ nm}$  und einem Magnetfluss  $\Phi/\Phi_0 = 8,5$ . Unter diesen Parametern führt das Pinning-Zentrum in den Bereichen I oder III (+) (siehe Abb. 3) zu einer qualitativen Veränderung der Wirbeldynamik. Am Ort des Pinning-Zentrums am Halbzylinder wird die Wirbelkeimbildung unterdrückt. Im Unterschied von einer ebenen Struktur, entsteht in einer Röhre jedoch zusätzlich eine Wirbeldynamik auf der gegenüberliegenden Seite. Durch die Erhöhung der Transportstromdichte kann man die Auswirkungen des Pinning-Zentrums reduzieren. Dies wird in Abb. 4 dargestellt, wo schwarze Kreise die Streuung der charakteristischen Zeiten ( $\Delta t_1, \Delta t_2$ ) bei  $j = 1,30$  (in dimensionslosen Einheiten) für verschiedene Positionen des Pinning-Zentrums darstellen (einige der Punkte, die sich im Unendlichen befinden, sind nicht gezeigt). Es leitet sich *ein sehr starker Einfluss der Pinning-Zentren auf die Wirbeldynamik* ab.

Bei einer erhöhten Transportstromdichte ( $j = 1,50$ ), wird eine ähnliche Abhängigkeit der charakteristischen Zeiten (grüne Kreise in Abb. 4) gefunden. Jedoch sind die Variationen der charakteristischen Zeiten bis  $\Delta t_{1\text{max}}/\Delta t_{1\text{min}} = 1,54$  und  $\Delta t_{2\text{max}}/\Delta t_{2\text{min}} = 2,07$  reduziert. Mit einem weiteren Anstieg der Transportstromdichte (bis auf  $j = 1,70$ ), bilden die Werte der charakteristischen Zeiten ein noch kleineres Cluster (rote Kreise in Abb. 4):  $\Delta t_{1\text{max}}/\Delta t_{1\text{min}} = 1,25$  und  $\Delta t_{2\text{max}}/\Delta t_{2\text{min}} = 1,56$ . Durch eine geeignete Positionierung der Pinning-Zentren wird die Wirbelkeimbildung und damit die Schwellentransportstromdichte kontrolliert.



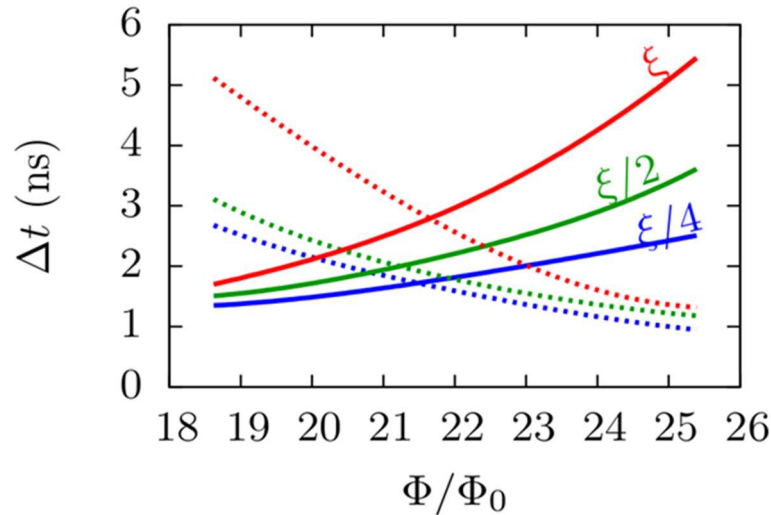
**Abb. 4.** Streuung der charakteristischen Zeiten für verschiedene Positionen eines einzigen Pinning-Zentrums [1]. Zuerst berechnen wir die charakteristischen Zeiten für Wirbel auf den beiden Seiten der Röhre bei einer festgelegten Position vom Pinning-Zentrum. Die erhaltenen Werte der charakteristischen Zeiten werden dargestellt als ein Punkt auf der Ebene ( $\Delta t_1, \Delta t_2$ ). Dann verschieben wir leicht die Position des Pinning-Zentrums, berechnen und zeichnen wieder die charakteristischen Zeiten. Das Verfahren wird wiederholt, bis das Pinning-Zentrum über die gesamte Oberseite der Röhre variiert wurde.

Um die dritte Dimension mit zu integrieren, müssen wir in unserem mathematischen Modell die Renormierung des Vektorpotentials aufgrund des von supraleitenden Strömen induzierten Magnetfelds berücksichtigen. Wir haben dies durch das Gleichungssystem (Ginzburg-Landau-Gleichung und die zeitabhängige Vektorpotential-Gleichung) realisiert:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = (\nabla - i\mathbf{A})^2 \psi + 2\kappa^2 \psi (1 - |\psi|^2),$$

$$\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{j}_s.$$

Damit haben wir ein Beispiel für ein rekursives physikalisches System: der Ordnungsparameter definiert das induzierte Vektorpotential, das wiederum den Ordnungsparameter bestimmt. Bei Variesierung der Dicke der Zylinderwand beobachten wir eine Abhängigkeit der charakteristischen Zeiten von der Dicke (s. Abb. 5). Diese Abhängigkeit für  $\Delta t_1$  wird bei höherem Magnetfluss stärker. Bei  $\Phi/\Phi_0 \approx 25$  erhöht sich  $\Delta t_1$  fast zweimal bei jeder Verdoppelung der Dicke, während es bei  $\Phi/\Phi_0 \approx 19$  fast keine Veränderung von  $\Delta t_1$  gibt (für  $\Delta t_2$  ist die Situation genau das Gegenteil).



**Abb. 5.** Charakteristische Zeiten als eine Funktion des Magnetflusses bei verschiedenen Zylinderwanddicken (die als ein Teil der Kohärenzlänge  $\xi$  gezeigt sind). Durchgezogene (gepunktete) Linien zeigen  $\Delta t_1$  ( $\Delta t_2$ ).

Unsere numerische Realisierung des Modells basiert auf dem Finite-Differenzen-Ansatz für den Zeitbereich. Wir haben unsere Ergebnisse unter Verwendung des Hochleistungsrechnens bekommen, das uns die *Implementierung der viel-Parameter-Simulation* ermöglicht. Dies bedeutet die Durchführung der Rechenroutinen mit unterschiedlichen Parametern auf verschiedenen Rechnerknoten. Der Code für die Simulation ist in C++ und Matlab Programmiersprachen geschrieben. Wir haben C++ verwendet, um den zeitraubenden Iterationskern für den Finite-Differenzen-Ansatz zu realisieren. Matlab ist nützlich für die Weiterverarbeitung der mit C++ erworbenen Ergebnisse, da Matlab eine benutzerfreundliche Oberfläche hat, um die Ergebnisse der sehr großen Dateien zu visualisieren.

Die entwickelte numerische Realisierung in C++ ist der Teil des geplanten HPC-GUI (graphical user interface). Dies hat uns geholfen, die Systeme mit verschiedenen

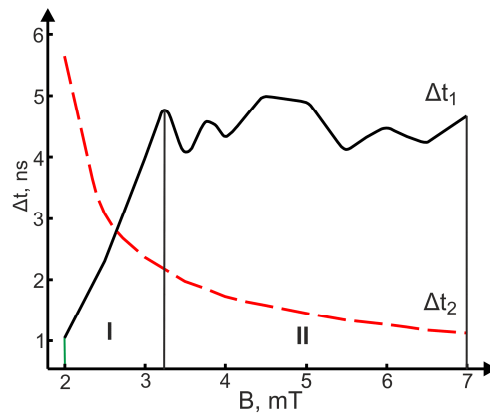
geometrischen und physikalischen Parametern und unterschiedlichen Pinning-Zentren zu simulieren, die für experimentelle Arbeiten von Interesse sind.

## **Ergebnisse der 2. Phase**

In der zweiten Phase (01.04.2014-31.03.2015) wurde die Untersuchung der Eigenschaften von supraleitenden Nanoröhren fortgesetzt. Insbesondere haben wir die Wirbeldynamik einer offenen Röhre in einem starken äußeren Magnetfeld (im Vergleich zu den bisher analysierten Magnetfeldern) untersucht. Wir haben ein nichttriviales Verhalten der charakteristischen Zeiten der Wirbeldynamik mit einem monotonen Teil und einem nicht-monotonen Teil festgestellt.

Der Effekt des Magnetfeldes auf die Zeit  $\Delta t_1$ , die ein Wirbel benötigt um eine Röhre von einer Kante zu der gegenüberliegenden Kante in Längsrichtung zu durchqueren, wurde während des ersten Jahres des Projektes untersucht. Als Weiterentwicklung haben wir im zweiten Jahr des Projekts die höheren Werte des Magnetfeldes für die dieselbe Geometrie der offenen Röhre berücksichtigt (Abb. 1) und das nichtmonotone Verhalten der charakteristischen Zeit  $\Delta t_1$  gefunden (Abb. 6).

Die Abhängigkeit der Zeit  $\Delta t_1$  vom Magnetfeld  $B$  kann in zwei Bereiche eingeteilt werden: der erste Bereich (**I** in Abb. 6) entspricht dem fast linearen Anstieg und die zweite Bereich (**II**) besitzt einen komplexen nichtlinearen Charakter. Ein solches Verhalten wird durch das Vorhandensein quasistationärer Wirbelmuster in der Röhre hervorgerufen (die Verteilungen von Wirbeln, die sich entlang bestimmter Bahnen bewegen und in einem bestimmten Bereich des Magnetfeldes mit der Zeit stabil sind). Eine Änderung im Wirbelmuster geht mit einer Änderung des Anstiegs der Kurve  $\Delta t_1(B)$  einher. Die Existenz der Wirbelmuster und ihre sequentiellen Änderungen sind eine Folge des nichtlinearen physikalischen Systems. Insbesondere der Bereich **I** in Abb. 6 entspricht der Dynamik von jeweils einer Reihe von Wirbeln an der Ober- und Unterseite der Röhre. Hierbei nehmen alle Wirbel an der Dynamik teil. Ein Übergang zum Bereich **II** ist gekennzeichnet durch das Auftreten einer zusätzlichen Reihe von Wirbeln, die an der Translationsbewegung nicht teilnehmen, sondern etwas um ihre Gleichgewichtspunkte schwingen. Der Bereich **II** spiegelt die Menge von unterschiedlichen Wirbelmustern auf der Zylinderoberfläche wider. Jedes Muster besitzt dabei seinen charakteristischen Anstieg der Kurve  $\Delta t_1(B)$  und beschreibt eine ganz bestimmte Wirbeldynamik.



**Abb. 6.** Abhängigkeit von  $\Delta t_1$  (die schwarze durchgezogene Linie) und  $\Delta t_2$  (die rote gestrichelte Linie) vom Magnetfeld für die Nanoröhre [2]. Es treten zwei Regionen für  $\Delta t_1$  auf (I und II): die erste weist ein monotonen Wachstum auf und die zweite zeigt ein komplexes Verhalten.

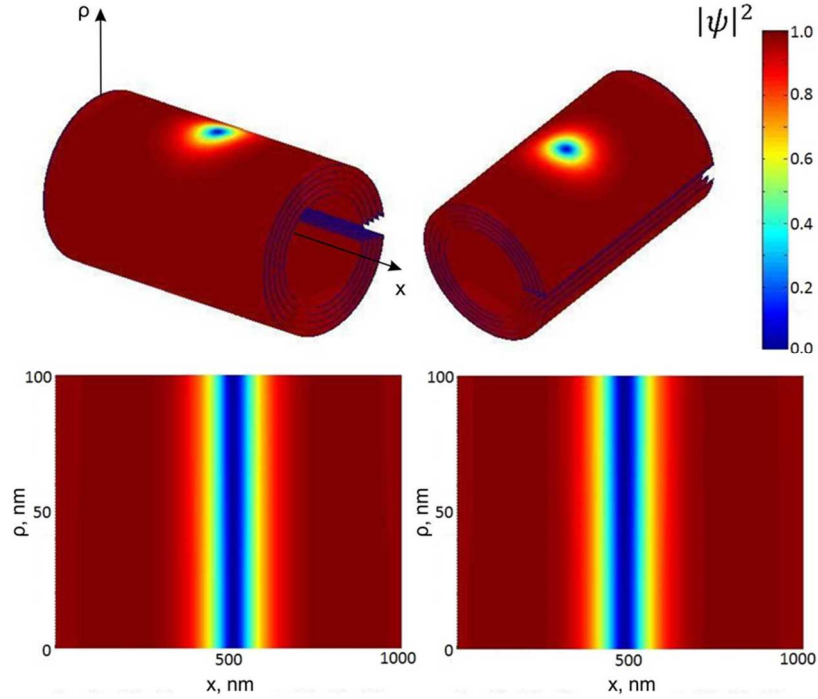
### Ergebnisse der 3. Phase

Im dritten Jahr des Projekts (01.04.2015-31.03.2016) haben wir die detaillierte Analyse der für das Experiment relevanten Phänomene durchgeführt: den Einfluss der Inhomogenität des Transportstroms, die thermische Wirkung der Wirbelbewegung und die Wechselwirkung zwischen dem externen Magnetfeld und dem durch den supraleitenden Strom induzierten Magnetfeld (Meissner-Effekt). Wir haben gezeigt, wie die Dissipation der Energie in zylinderartigen Strukturen durch eine entsprechende Anordnung der Elektroden verringert wird. Die thermischen Effekte im spärlichen Regime führen zu einer geringen Temperaturerhöhung, jedoch könnte die kollektive Bewegung der Wirbel (Anzahl von etwa 1000) eine Erwärmung des Materials verursachen, welche die supraleitende Phase zerstört.

Im Rahmen dieses Projekts entwickelten wir anfangs ein mathematisches Modell auf der Grundlage der Ginzburg-Landau-Theorie für einen offenen Zylinder, welches die Gleichung für das Vektorpotential umfasst. Im Laufe des dritten Jahres wurde der Algorithmus zur Berechnung des Vektorpotentials  $A$  deutlich verbessert. Das ermöglichte es uns, das renormalisierte Magnetfeld abzuleiten. Dieses ist eine Superposition von zwei magnetischen Feldern: dem äußeren Feld und dem durch zirkulierende supraleitende Ströme erzeugten Feld. Die Ergebnisse der Simulation des Ordnungsparameters auf dem Zylinder mit dem Radius  $R = 300$  nm, der Dicke  $H = 100$  nm, der Breite  $W = 1000$  nm für das externe Magnetfeld  $B = 10$  mT bei der relativen Temperatur  $t = T/T_c = 0,95$ , wobei  $T_c$  die kritische Temperatur ist, sind in Abb. 7 dargestellt. Die Verteilung des Betrags des Ordnungsparameters  $|\psi|$  ist durch 3D-Ansichten und Querschnitte der oberen und unteren Halbzylinder über die Dicke der supraleitenden Probe gezeigt.

In Abb. 8 ist die Verteilung des renormalisierten Gesamtmagnetfeldes als Superposition der Normalkomponente des externen Magnetfeldes und des durch die supraleitenden Ströme induzierten Magnetfeldes dargestellt. Für die vorgenannten Zylinderabmessungen beträgt der Effekt der Renormalisierung etwa 20%. Aus dem Vergleich der Abb. 7 mit der Abb. 8, wird es deutlich, dass das induzierte Magnetfeld die Raumstruktur des Ordnungsparameters

repliziert. In der Mitte des Wirbels tritt die normale Phase auf. Dadurch ist das Magnetfeld in der Lage, den Wirbelkernbereich zu durchdringen. Außerhalb des Wirbelbereichs, aber immer noch innerhalb des Supraleiters, ist das induzierte Magnetfeld umgekehrt zum äußeren Magnetfeld.



**Abb. 7.** Verteilung des Ordnungsparameters  $|\psi|^2$  in einem offenen Nb-Zylinder. Oben: die  $|\psi|^2$ -Verteilung über dem Zylinder in 3D. Unten: die  $|\psi|^2$ -Verteilung über die 2D  $\rho$ - $x$ -Ebene.

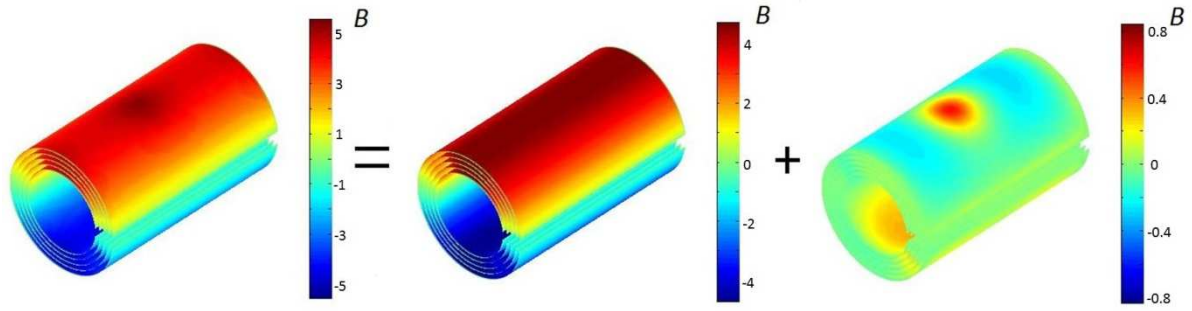
Der Grund für die erforderliche Verbesserung des Algorithmus zur Berechnung des Vektorpotentials  $\mathbf{A}$  war die sehr zeitaufwendige numerische Lösung der Poisson-artigen Differentialgleichung für das Vektorpotential:

$$\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{j}_s.$$

Im neuen Algorithmus ersetzen wir diese Lösung mit Finite-Differenz-Verfahren durch die Integrierung der Green-Funktion über das erforderliche Volumen der Probe:

$$\mathbf{A}_s(\mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi} \int \frac{\mathbf{j}_s(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3\mathbf{r}'.$$

Diese Ersetzung beschleunigte unsere numerische Routinen um den Faktor drei und ermöglichte uns, die Daten für die Abbildungen 7 and 8 zu erhalten, die von großer Bedeutung für das Verständnis der Wirbeldynamik in Nanostrukturen auf der mikroskopischen Ebene sind.



**Abb. 8.** Die senkrechte zur Zylinderoberfläche Komponente des Magnetfeldes. Das Gesamtmagnetfeld ist eine Superposition des äußeren Magnetfeldes und des durch die supraleitenden Ströme induzierten Magnetfeldes.

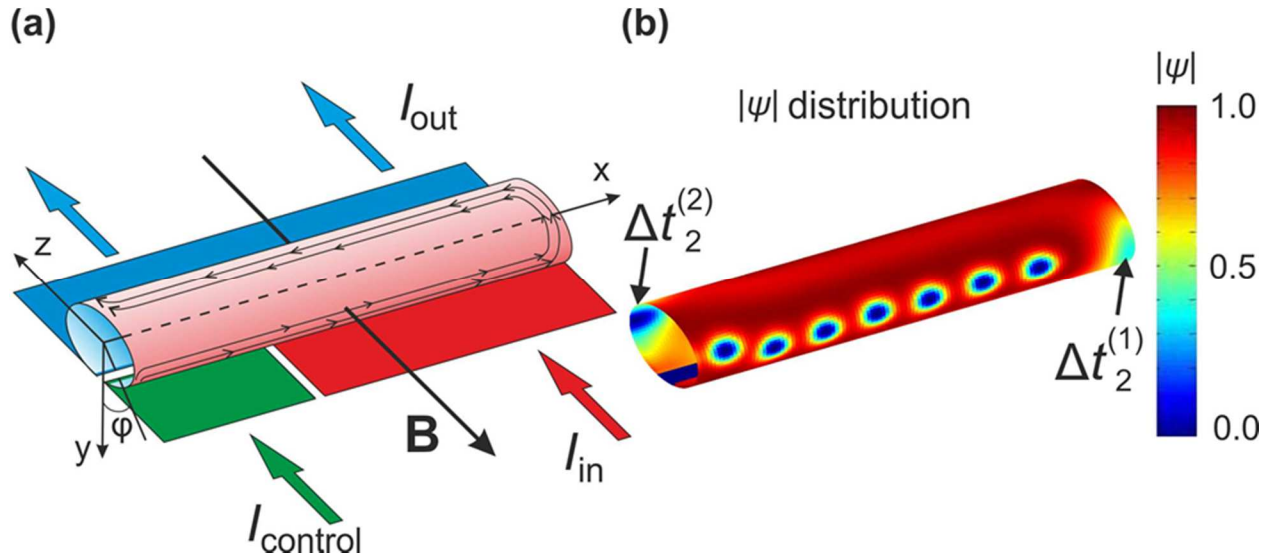
In diesem Abschnitt präsentieren wir unsere Ergebnisse für die Bewertung der Wirkung einer Zweikomponentenelektrode auf die Wirbeldynamik in einem offenen Nb-Zylinder und zeigen die Möglichkeit, ihre Charakteristiken effizient zu steuern. Als Beispiel wird die Verzweigung für die Periode der Wirbelbildung dargestellt.

Wir betrachten einen supraleitenden offenen Nb-Zylinder mit dem Radius  $R$  und der Länge  $L$  (Abb. 9) mit drei Kontakten entlang der Achse auf den Kanten des Schlitzes. Der “rote” Kontakt spielt die Rolle eines Eingangskontakts, durch den der Transportstrom  $I_{in}$  eintritt. Durch den “blauen” Kontakt, verlässt der Strom  $I_{out}$  den Zylinder. Durch den “grünen” Steuerkontakt tritt zusätzlich der Transportstrom  $I_{control}$  ein. Dieser kann entweder positiv (in) oder negativ (out) sein. Seine Aufgabe ist es, die Wirbelbildung dynamisch zu steuern. Zu jedem Zeitpunkt erfüllt die Summe aller drei Ströme den kirchhoffschen Knotenpunktsatz:

$$I_{in} + I_{control} + I_{out} = 0.$$

Das Schema der Steuerung wird in folgender Weise realisiert: der Strom  $I_{control}$  wird durch Änderung des Potentials an der Steuerelektrode (“grün”) modifiziert. Danach wird das Potential an der Eingangelektrode (“rot”) so eingestellt, dass der Strom  $I_{in}$  seinen konstanten Wert hält. Die Ausgangselektrode (“blau”) ist geerdet, so dass der Wert  $I_{out}$  aus dem kirchhoffschen Knotenpunktsatz bestimmt wird.

Das System befindet sich in einem magnetischen Feld  $\mathbf{B} = -B\mathbf{e}_z$  (Abb. 9), das in jedem Halbzylinder zirkulierende Meissnerströme induziert. Der Gesamtstrom, der eine Summe von Meissner- und Transportströmen ist, wird schematisch in Abb. 9 durch die schwarzen Linien an dem vorderen Halbzylinder dargestellt. Zwei von drei Strömen im kirchhoffschen Knotenpunktsatz sind unabhängig, was die unterschiedlichen Regime der Wirbeldynamik ermöglicht. In unserer Analyse bleibt  $I_{in}$  konstant und es ändert sich nur  $I_{control}$ .

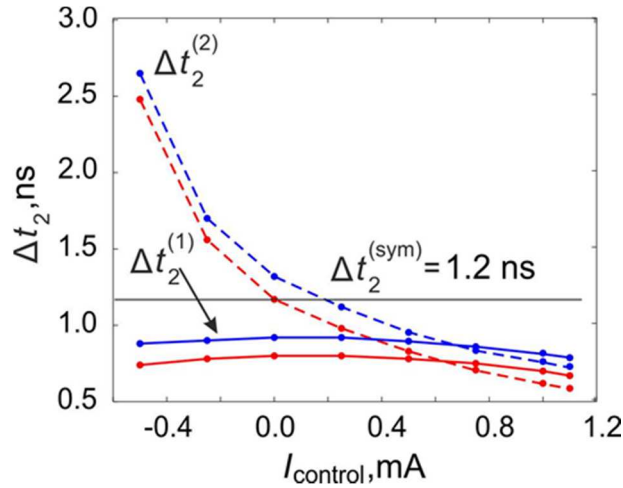


**Abb. 9.** (a) Schema eines offenen Zylinders. Drei voneinander isolierte Elektroden werden als rote, blaue und grüne Bereiche angezeigt [3]. Die  $x$ -Achse ist die Achse des zylindrischen Koordinatensystem  $(\rho, \phi, x)$ . (b) Ein Beispiel für die Verteilung der Amplitude des Ordnungsparameters  $|\psi|$  im Magnetfeld  $B = 10$  mT für einen Zylinder mit Radius  $R = 500$  nm und Länge  $L = 3,5$   $\mu\text{m}$ . Die Wirbel bilden sich an den vorderen und hinteren Halbzylindern entsprechend mit den Perioden  $\Delta t_2^{(1)}$  und  $\Delta t_2^{(2)}$  und bewegen sich entlang der  $x$ -Achse und denukleieren am Rand.

Die Abhängigkeit  $\Delta t_2$  vom Steuerstrom in Abb. 10 zeigt ein unterschiedliches Verhalten für jeden Halbzylinder. Wir führen Simulationen für zwei Radien des Zylinders durch. In Abb. 10 entspricht die blaue (rote) Linie dem Radius  $R = 600$  nm (400 nm). Eine Erhöhung des Radius verschiebt sowohl  $\Delta t_2^{(1)}$  als auch  $\Delta t_2^{(2)}$  nach oben. Wie aus Abb. 10 folgt, erreicht das Verhältnis zwischen den Nukleationsperioden  $\Delta t_2^{(1)}$  und  $\Delta t_2^{(2)}$  circa den Wert 3. Dieser Faktor, wie aus unserer Simulation hervorgeht, wird durch den Steuerstrom bestimmt. Wegen der Inhomogenität der Stromdichteverteilung über den gesamten Zylinder, führt eine Variation des Steuerstroms auf einer Seite des Zylinders zu einer Veränderung der Entstehungsperiode auf der gegenüberliegenden Seite. Eine weitere (über die in Abb. 10 angegebenen Werte) Verringerung des Steuerstroms führt zu einem unendlichen Anstieg von  $\Delta t_2^{(2)}$ , was bedeutet, dass die Wirbelbildung auf einer Seite des Zylinders blockiert wird. Die Wirbeldynamik erfolgt dann ausschließlich auf der anderen Seite des Zylinders.

Für die praktische Anwendung der vorgeschlagenen Anordnung der Elektroden, muss die durchschnittliche Anzahl von Wirbeln pro Nanosekunde bewertet werden, wenn die Wirbeldynamik nur an einer Seite des Zylinders erfolgt. In dem Zylinder mit Radius  $R = 400$  nm, Länge der Steuerelektrode  $L_{control} = 1120$  nm und  $I_{control} = -0.5$  mA, führen die charakteristischen Zeiten  $\Delta t_2^{(2)} \rightarrow \infty$  und  $\Delta t_2^{(1)} \approx 0.7$  ns zu einer durchschnittlichen Anzahl von  $n_v \approx 1,43$  Wirbeln je Nanosekunde. Im Gegensatz dazu beträgt  $n_v \approx 1,67$  pro Nanosekunde, wenn die Elektrode  $I_{in}$  die komplette Zylinderlänge abdeckt. Durch die dritte Elektrode  $I_{control}$  kann die durchschnittliche Wirbelanzahl um  $\sim 15\%$  bei gleicher Gesamtstromstärke reduziert werden. Somit führt die Verwendung eines inhomogenen Transportstroms im Zylinder zu

einer effektiven Verringerung der durchschnittlichen Wirbelanzahl. Eine solche Verringerung spielt eine entscheidende Rolle bei der Reduktion vom Rauschen und Energiedissipation für zahlreiche Anwendungen der Supraleiter. Die Eigenschaft  $\Delta t_2^{(2)} \rightarrow \infty$  bedeutet, dass die Verwendung von Mehrkomponentenelektroden zu wirbelfreien Bereichen einer supraleitenden Probe führen kann. Dies ist von praktischem Interesse, z. B., um das 1/f-Rauschen aufgrund des aktivierten Hoppings von eingefangenen Wirbeln zu unterdrücken und das Arbeitsregime der supraleitenden Sensoren hin zu niedrigeren Frequenzen zu erweitern.



**Abb. 10.** Wirbelbildungsperiode als Funktion des Transportstroms [3]. Die blaue Linie entspricht dem Zylinder mit dem Radius  $R = 600$  nm und die rote Linie entspricht dem Zylinder mit dem Radius  $R = 400$  nm. Die Länge  $L$  der beiden Zylinder beträgt  $L = 60\xi = 3360$  nm. Die Länge der Steuerelektrode ist  $L_{\text{Control}} = 20\xi = 1120$  nm. Der Eingangsstrom beträgt 1,7 mA.  $\Delta t_2^{(2)}, \Delta t_2^{(1)}$  sind Perioden der Wirbelbildung an gegenüberliegenden Seiten des Zylinders (s. Definition im Text). Die schwarz durchgezogene Linie stellt den Fall von Vollseitenelektroden dar, wenn die Module des Eingangs- und Ausgangsstromes für einen Zylinder mit  $R = 400$  nm gleich 1,7 mA sind. Das Magnetfeld beträgt  $B = 10$  mT.

Eine Erwärmung von dünnen Supraleitern durch die Wirbelbewegung wurde untersucht. Es wurde gezeigt, dass bei geringen Magnetfeldern (das spärliche Regime der Wirbeldynamik) die Temperaturerhöhung im Bereich von rund  $10^{-3}$  K liegt. Dieser Wert erscheint zu klein um einen Übergang zur normalen Phase zu induzieren. Wenn sich das Magnetfeld jedoch dem zweiten kritischen Wert nähert, steigt die Temperatur um etwa 1 K, was ausreichen könnte um die supraleitende Phase zu zerstören.

## **Ergebnisse**

### **Publikationen**

- [1] R. O. Rezaev, V. M. Fomin, O. G. Schmidt, “Vortex dynamics controlled by pinning centers on Nb superconductor open microtubes”, *Physica C* **497**, 1- 5 (2014).
- [2] R.O. Rezaev, E.A. Levchenko, O.G. Schmidt, V.M. Fomin, “Dynamics of Abrikosov vortices on cylindrical microtubes”, *Russian Physics Journal* **58**, 623-628 (2015).
- [3]. R. O. Rezaev, E. A. Levchenko, V. M. Fomin, “Branching of the vortex nucleation period in superconductor Nb microtubes due to inhomogeneous transport current”, *Supercond. Sci. Tech.* **29**, 045014, 1-7 (2016).

### **Präsentationen auf wissenschaftlichen Konferenzen**

- [4] V. M. Fomin (Plenarvortrag), “Tunable vortex dynamics in open superconductor micro- and nanotubes”, Xth International Conference “Prospects of Fundamental Sciences Development”, Tomsk, Russia, April 23-26, 2013, Program, S. 11.
- [5] V. M. Fomin, R. R. Dusaev, R. O. Rezaev, O. G. Schmidt, “Dynamics of superconductor vortices in finite-thickness Nb open microtubes”, TT 33.1, DPG-Frühjahrstagung, 30.03-04.04.2014, Dresden. Verhandlungen der DPG, Nr. 4, 2014, S. 424.
- [6] V. M. Fomin (Eingeladener Vortrag), “Vortex dynamics in rolled-up superconductor nanostructures”, International Conference on Problems of Strongly Correlated and Interacting Systems, St. Petersburg, Russia, May 28-31, 2014, Program, S. 2.
- [7] R. O. Rezaev, E. A. Levchenko, O. G. Schmidt, V. M. Fomin, “Numerical modeling of superconducting vortices in Nb microtubes”, Proceedings of the 23rd International Conference “Mathematics. Computing. Education”, Dubna, Russia, January 25-30, 2016, S. 219
- [8] V.M. Fomin (Eingeladener Vortrag), “Vortex dynamics in self-assembled superconductor micro- and nanostructures” beim COST Action “Nanoscale Superconductivity” Workshop “Probing Superconductivity at the Nanoscale: New advances”, Saas-Fee, Switzerland, April 12-15, 2016, Programme and Abstract Book, S. 38.
- [9] V. M. Fomin (Eingeladener Vortrag), “Vortex matter in rolled-up superconductor micro- and nanotubes”, International Conference on Nano confined superconductors and their applications, Garmisch-Partenkirchen, Germany, September 3-7, 2016, Program and Abstract Book, S. 43.
- [10] R. O. Rezaev, E. A. Levchenko, V. M. Fomin (Eingeladener Vortrag), “Simulation of rolled-up superconductor micro- and nanotubes”, 8th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, Abstracts of the 8th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, Chisinau, Moldova, September 12-16, 2016, S. 48

### **Arbeitsbesuche**

1. Arbeitsbesuch des russischen Teilnehmers Herrn **Renat Dusaev** am IIN, IFW Dresden (01.09. bis 30.11.2013). Während seines Aufenthaltes in Dresden wurde die numerische

Realisierung der Ginzburg-Landau-Gleichung kombiniert mit den Maxwell-Gleichungen durchgeführt. Diese Ergebnisse wurden vorgetragen bei der DPG-Frühjahrstagung 2014 [5]:

2. Arbeitsbesuch von Prof. Dr. V. Fomin in Russland (Tomsk, 22.04 bis 25.04.2013; Moskau, 26.04 bis 28.04 2013). Kick-off-Treffen mit den lokalen Teilnehmern (Prof. Dr. A. Yu. Trifonov, Dr. R. Rezaev, R. Dusaev, E. Levchenko) durchgeführt. Der physikalische Hintergrund des mathematischen Modells wurde diskutiert. Prof. Dr. V. Fomin gab einen eingeladenen Plenarvortrag [4] an der X. Internationalen Konferenz "Perspektiven der Entwicklung der Grundlagenwissenschaften" am 23.04.2013 an der Polytechnischen Universität Tomsk und einen eingeladenen Vortrag "Electronic properties of Möbius microrings" am 24.04.2013 an der Staatlichen Universität Tomsk.

3. Arbeitsbesuch von Prof. Dr. V. Fomin in Russland (Moskau, 26.10. bis 02.11.2013). Arbeitstreffen mit dem russischen Partner Dr. R. Rezaev (Moscow Physical Engineering Institute) wurden durchgeführt. Die Entwicklung der numerischen Umsetzung des mathematischen Modells wurde entworfen. Prof. Dr. V. Fomin hielt auf Einladung den Vortrag "Role of Topology on Electronic and Thermal Properties of Solid State Nanostructures" am 30.10.2013 an der Fakultät für Physik der Moskauer Staatlichen Lomonosow-Universität.

4. Besuch des russischen Teilnehmers Herrn **Evgenii Levchenko** am IIN, IFW Dresden (01.09. bis 30.11.2014). Ergebnisse seines Aufenthalts in Dresden sind: numerische Lösung der Ginzburg-Landau-Gleichung auf einer Nanostruktur und numerische Untersuchung des Effekts der Geometrie auf das Startfeld der Wirbeldynamik.

5. Arbeitstreffen von Prof. Dr. V. Fomin im Rahmen des BMBF-Projekts "Kontrolle supraleitender Wirbeldynamik in Nb rolled-up-Nanostrukturen" in Moskau, Russische Föderation, 24.5. bis 26.5.2014, 04.10. bis 07.10.2014 und 12.10. bis 13.10.2014. Teilnahme von Prof. Dr. V. Fomin mit einem eingeladenen Vortrag an "International Conference on Problems of Strongly Correlated and Interacting Systems" in St. Petersburg, Russische Föderation, 28.5. bis 31.5.2014. Dort hielt er auf Einladung einen Vortrag [6].

6. Prof. Dr. V. Fomin hielt beim Seminar und Arbeitstreffen am "Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences", Novosibirsk, Russische Föderation, 08.10. bis 11.10.2014 auf Einladung einen Vortrag.

7. Besuch des russischen Teilnehmers Herrn Dr. **Roman Rezaev** am IIN, IFW Dresden (01.08. bis 30.10.2015). Ergebnisse seines Aufenthalts in Dresden sind: (1) Verbesserung der Algorithmen der numerischen Berechnung des Vektorpotentials; (2) Untersuchung des Effekts eines inhomogenen Transportstroms; (3) Evaluierung der thermischen Wirkung der bewegenden Wirbel in supraleitenden Nanostrukturen.

8. Prof. Dr. V. Fomin hielt auf Einladung den Vortrag "Theory of vortices in self-assembled superconducting micro- and nanostructures" beim Seminar "Institute of Electronics and NanoEngineering "D. GITU", Academy of Sciences of Moldova", Chisinau, Republik Moldau, 26.03.2015.

9. Prof. Dr. V. Fomin hielt auf Einladung den Vortrag "Vortex dynamics in self-assembled superconductor micro- and nanostructures" beim Seminar am "Instituto de Ciencia de

Materiales Nicolás Cabrera, Universidad Autónoma de Madrid”, Madrid, Spanien, 09.06.2015.

10. Arbeitsbesuch von Prof. Dr. V. Fomin in Russland (Moskau, 17.06. bis 21.06.2015). Arbeitstreffen mit dem Russischen Partner und Finalisierung des gemeinsamen Manuskripts über Wirbeldynamik in Moskau, Eingeladener Vortrag von Prof. Dr. Vladimir Fomin “Dynamics of vortices in self-organized superconductor micro- and nanostructures” im Seminar “Tieftemperaturphysik und Supraleitung” an der Staatsuniversität Moskau am 18.06.2015.

11. Arbeitsbesuch von Prof. Dr. V. Fomin in Russland (Moskau, 09.07. bis 20.07.2015). Bewertung der im Rahmen des Projekts “Kontrolle supraleitender Wirbeldynamik in Nb rolled-up-Nanostrukturen” gewonnenen Ergebnisse und Ausarbeitung eines gemeinsamen Artikels in Moskau.

12. Arbeitsbesuch von Prof. Dr. V. Fomin in Russland (Moskau, 26.01. bis 03.02.2016). Arbeitstreffen mit dem Russischen Partner und Finalisierung des gemeinsamen Manuskripts über Wirbeldynamik in Moskau. Prof. Dr. Vladimir Fomin hielt auf Einladung zwei Vorträge: “Impact of topology and geometry on physical properties of solid-state micro- and nanostructures” beim Seminar “Physical Materials Science” am “Institute of Solid State Physics RAS”, Chernogolovka, Russische Föderation, 27.01.2016 und “Vortex dynamics in self-organized superconductor micro- and nanostructures” beim Seminar am “Moscow Institute of Electronics and Mathematics HSE-NRU”, Moskau, 28.01.2016.

13. Prof. Dr. V. Fomin hielt auf Einladung den Vortrag “Vortex dynamics in self-assembled superconductor micro- and nanostructures” beim Seminar am “Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Napoli”, Napels, Italien, 21.03.2016.

### III. Erfolgskontrollbericht

#### 1. Der Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Die Aktivitäten während des Zeitraums des Projekts tragen zur Verwirklichung der Ziele des Förderprogramms bei. Die Teilnehmer von beiden Seiten (Deutschland und Russische Föderation) haben die Erfahrungen miteinander ausführlich ausgetauscht. Der aktive Austausch von wissenschaftlichem Fachpersonal war eine entscheidende Komponente, die zum Erfolg des Vorhabens beitrug. Jedes Jahr gab es mehrere Arbeitsbesuche des deutschen Partners in Russland, wo vor allem die Ergebnisse kommuniziert und evaluiert wurden und weitere Schritte sowie wissenschaftliche Anschlussmöglichkeiten erörtert wurden. Die russischen Teilnehmer haben für insgesamt 9 Monate das IIN des IFW Dresden besucht. Jeder Besuch wurde vom Projektvorhaben geplant, bevor die jährliche Finanzierung begann. Die Russischen Partner haben die Möglichkeit des umfassenden Austauschs mit den Experimentatoren am IIN, IFW Dresden erhalten. Sie haben diese Gruppe die Ergebnisse der numerischen Simulation von realistischen Nanostrukturen zur Verfügung gestellt. Die finanzielle Förderung im Rahmen dieses Projekts hat den Teilnehmern von beiden Seiten erlaubt, ihre Ergebnisse auf zahlreichen Seminaren und Konferenzen zu präsentieren und in maßgebenden internationalen Zeitschriften zu veröffentlichen.

#### 2. Das wissenschaftlich-technische Ergebnis des Vorhabens

Im Rahmen des Projekts wurde gezeigt, dass die Simulationen der supraleitenden Phänomene in verschiedenen gekrümmten Nano- und Mikrostrukturen auf einer Rechenplattform integriert werden können. Der wissenschaftliche Wert dieses Projekts lag in der Möglichkeit, die Wirbeldynamik in gekrümmten Strukturen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Verteilungen von Pinning-Zentren sowie des Eindringens vom elektrischen Feld in die Probe zu untersuchen. Transportströme, Magnetfelder und geometrische Parameter von Nano- und Mikrostrukturen spielen die Schlüsselrolle bei der Wirbeldynamik. Mit Hilfe unserer Simulation-Software können die Informationen über die Wirbeldynamik und ihre Auswirkungen auf die supraleitenden Eigenschaften verschiedener gekrümmter Strukturen simuliert werden. Der technische Wert des Projekts geht aus modernen numerischen Ansätzen zur Simulation der Supraleitung mit Hochleistungsrechnen (HPC Systemen) hervor. HPC beschleunigt die Simulationsgeschwindigkeit um 1 bis 2 Größenordnungen. Z. B., können 1 bis 2 Nanostrukturen pro Tag mit Hilfe der numerischen Standardtechniken mit konventionellem CPU ausgewertet werden, während mit HPC 50 bis 100 Nanostrukturen pro Tag simuliert werden können.

Die Umsetzung unseres Projekts sah keine Patente oder gewährte Rechte vor. Unsere Software arbeitet unter der MIT-Lizenz und ist für die wissenschaftliche Gemeinschaft verfügbar. Wir haben keine kommerziellen Pakete verwendet, um wissenschaftliche oder technische Schlussfolgerungen zu erzielen. Obwohl die durch uns entwickelte Software keine kommerziellen Interessen verfolgt, hilft sie das Experiment zu entwerfen und zu optimieren. Speziell die Suche nach physikalischen/geometrischen Parametern eines Systems, die die neuen physikalischen Effekte [wie z. B. die Unterdrückung der Wirbelbildung aufgrund von Krümmung (Abb. 10)] hervorrufen, können mit der entwickelten Software vorher abgeschätzt

werden. Dieser Ansatz ist ökonomisch sinnvoll, da viel Zeit im Experiments-Zyklus eingespart werden kann, was für die experimentelle Arbeit von entscheidender Bedeutung ist. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass unsere im Rahmen des Projekts durchgeführte Arbeit ein innovatives Instrument für die Experimentatoren für das virtuelle Design von Experimenten in supraleitenden gekrümmten Nano- und Mikrostrukturen zur Verfügung gestellt hat.

Während unserer Zusammenarbeit mit dem HPC-Zentrum (ZIH bei der TU Dresden) wurde eine Vielzahl von verschiedenen Skripten entwickelt, die es ermöglichen, die gewonnenen umfangreichen numerischen Daten zu visualisieren. Die numerischen Daten für 100 Nanostrukturen besitzen typischerweise eine Größe von einem Terrabyte. Diese Daten müssen nahezu in Echtzeit verarbeitet werden. Wir haben unsere entwickelten Algorithmen zur Daten-Visualisierung erfolgreich umgesetzt (siehe, z. B., die Ergebnisse der Abbildungen 7 und 8). Das entwickelte Software-Paket bietet einen erheblichen Mehrwert bei der Verarbeitung von Daten, die ähnlichen Problemen in benachbarten wissenschaftlichen Bereichen zugrunde liegen.

### 3. Fortschreibung des Verwertungsplans

Die erfolgreiche Umsetzung des Projekts stellt einem soliden Fundament für die weitere Zusammenarbeit dar. Wir planen einen Projektvorschlag im Rahmen des entsprechenden nächsten Aufrufs einzureichen. Z. B., passt das gemeinsame Programm zwischen DFG und RFFI [http://www.rfbr.ru/rffi/ru/international\\_announcement/o\\_1930304](http://www.rfbr.ru/rffi/ru/international_announcement/o_1930304) perfekt zu unserem Anforderungsprofil.

### 4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Es gab keine wesentlichen Leistungen, die zu keiner Lösung geführt haben.

### 5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Wie im Punkt 3 beschrieben, wurden die Möglichkeiten der Präsentation und Veröffentlichung der erzielten Ergebnisse im Rahmen der wissenschaftlichen Tätigkeit genutzt. Zum jetzigen Zeitpunkt ist es schwierig, bestimmte potenzielle Nutzer zu adressieren

### 6. Die Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Die Arbeit wurde in Übereinstimmung mit den Kosten- und Zeitplänen des Projekts umgesetzt.

Projektleiter

Prof. Dr. V. M. Fomin

Dresden, den 28.09.2016

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 1. ISBN or ISSN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)<br>Schlussbericht |
| 3. Titel<br><br>Abschlussbericht zum BMBF Projekt<br>Kontrolle supraleitender Wirbeldynamik in Nb rolled-up-Nanostrukturen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                         |
| 4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]<br>TPU: Rezaev, Roman; Levchenko, Evgenii; Dusaev, Renat<br>IIN: Fomin, Vladimir M.; Schmidt, Oliver G.;<br>Bürger, Danilo; Lösch, Sören                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 5. Abschlussdatum des Vorhabens<br>31.03.2016                           |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 6. Veröffentlichungsdatum<br>14.10.2016                                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 7. Form der Publikation<br>Bericht                                      |
| 8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)<br>Institut für Integrative Nanowissenschaften<br>IFW Dresden<br>Helmholtzstraße 20, D-01069 Dresden;<br>TPU Lenina av. 30, 634050 Tomsk, Russian Federation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 9. Ber. Nr. Durchführende Institution                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 10. Förderkennzeichen<br>01 DJ13009                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 11. Seitenzahl<br>18 + 2                                                |
| 12. Fördernde Institution (Name, Adresse)<br>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)<br>53170 Bonn                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 13. Literaturangaben:10                                                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 14. Tabellen:0                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 15. Abbildungen:10                                                      |
| 16. Zusätzliche Angaben                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                         |
| 17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)<br>Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB), Deutsche Forschungsberichte<br>Postfach 6080; 30060 Hannover<br>14.10.2016                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                         |
| 18. Kurzfassung<br><br>Der Bericht enthält eine vollständige Beschreibung des wissenschaftlichen Forschungsprojekts, das durch die bilaterale BMBF-Russland-Forschungsförderung 01 DJ13009 finanziert wurde. Die Projektdauer wird in drei Perioden unterteilt, die jeweils dem Jahr der Umsetzung entsprechen. Die grundlegende Aufgabe des Projekts war es zu untersuchen, wie die Nanostrukturierung von Materialien die supraleitenden Eigenschaften ändert. Auf Basis der zeitabhängigen Ginzburg-Landau Theorie wurde das mathematische Modell der supraleitenden Phänomene in krummlinigen Nanostrukturen erstellt. Die Validierung des Modells wurde durch Vergleich mit verfügbaren experimentellen Daten für planare Strukturen durchgeführt. Weiterhin wurde das erarbeitete Modell zur Untersuchung der Wirbeldynamik in krummlinigen Nanostrukturen in einem Magnetfeld angewendet. Der Einfluss von Pinning-Zentren und die Dissipation der Energie in Abhängigkeit von den Randbedingungen wurden analysiert. Die im Rahmen des Projekts erhaltenen wissenschaftlichen Ergebnisse zeigen deutlich die Vorteile der gekrümmten supraleitenden Nanostrukturen in modernen Anwendungen der Supraleitung. Während des Projekts wurde eine innovative Software entwickelt, welche als Instrument für das virtuelle Design von Experimenten in supraleitenden gekrümmten Nano- und Mikrostrukturen genutzt werden kann. |                                                                         |
| 19. Schlagwörter: Nanotechnologie, supraleitende Nanostrukturen, Abrikosov Wirbel, Wirbeldynamik, numerische Simulationen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                         |
| 20. Verlag<br>Technische Informationsbibliothek (TIB),<br>Deutsche Forschungsberichte, Welfengarten 1 B<br>30167 Hannover                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 21. Preis                                                               |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                |                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 1. ISBN or ISSN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2. type of document (e.g. report, publication)<br>Final Report |                                   |
| 3. Title<br><br>Final report of the BMBF project<br>“Control of superconducting vortex dynamics in Nb rolled-up nanostructures”                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                |                                   |
| 4. author(s) (family name, first name(s))<br>TPU: Rezaev, Roman; Levchenko Evgenii; Dusaev, Renat<br>IIN: Fomin, Vladimir M.; Schmidt, Oliver G.;<br>Bürger, Danilo; Lösch, Sören                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                | 5. end of project<br>31.03.2016   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                | 6. publication date<br>14.10.2016 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                | 7. form of publication<br>Report  |
| 8. performing organization(s) (name, address)<br>Institute for Integrative Nanosciences<br>IFW Dresden,<br>Helmholtzstraße 20, D-01069 Dresden;<br>TPU Lenina av. 30, 634050, Tomsk, Russia. Federation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                | 9. originator's report no.        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                | 10. reference no.<br>01 DJ13009   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                | 11. no. of pages:<br>18 + 2       |
| 12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium<br>für Bildung und Forschung (BMBF)<br>53170 Bonn                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                | 13. no. of references: 10         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                | 14. no. of tables: 0              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                | 15. no. of figures: 10            |
| 16. supplementary notes                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                |                                   |
| 17. presented at (title, place, date)<br>Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB), Deutsche Forschungsberichte<br>Postfach 6080, 30060 Hannover<br>14.10.2016                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                |                                   |
| 18. abstract:<br><br>The report presents a complete description of the scientific research projekt financed under the bilateral BMBF-Russia research grant 01 DJ13009. The whole period is divided into three stages, each corresponding to the year of implementation. The basic task of the project was to study how nanostructuring of materials changes the superconducting properties. Based on the time-dependent Ginzburg-Landau approach the mathematical model of superconducting phenomena in curvilinear nanostructures was created. The validation of the model was performed by comparison with the available experimental data for planar structures. Further elaborated model was applied to study the vortices dynamics in the curvilinear nanostructures placed into a magnetic field. The influence of pinning centers and the dissipation of energy as a function of boundary conditions were analyzed. Scientific results obtained in the framework of the project clearly demonstrate the benefits of using the curvilinear superconducting nanostructures in modern applications of superconductivity. Our work provided an innovative tool for virtual design of experiment in superconducting curvilinear nano- and microstructures. |                                                                |                                   |
| 19. keywords: nanotechnology, superconductor nanostructures, Abrikosov vortices, vortex dynamics, numerical simulations.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                |                                   |
| 20. publisher<br>Technische Informationsbibliothek (TIB),<br>Deutsche Forschungsberichte, Welfengarten 1 B<br>30167 Hannover                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                | 21. price                         |