

Darstellung der Forschungsleistung und des aktuellen Forschungsinteresses von Prof. Dr. Roland Wiesendanger

Die Nanowissenschaften stellen ein hoch aktuelles, interdisziplinäres Forschungsgebiet dar mit vielfältigen Anwendungen und Innovationspotentialen in den verschiedensten Industriebereichen, von der Informations- und Kommunikationstechnologie, über die Material- und Energiewirtschaft, bis hin zur Medizin. Obgleich man schon seit langer Zeit nanoskalige Objekte - wie etwa Kolloide und Moleküle - kannte, so war es in erster Linie die Möglichkeit der physikalischen Messung sowie der gezielten Kontrolle von einzelnen, individuellen Nanoobjekten bis hin zu Einzelatomen auf Oberflächen, welche das Gebiet der Nanowissenschaften begründet und substantiell vorangebracht haben. Als ein fundamentales Messinstrument der Nanowissenschaften und Werkzeug der Nanotechnologie hat sich das Rastertunnelmikroskop erwiesen, welches zu Beginn der achtziger Jahre durch Gerd Binnig und Heinrich Rohrer am IBM Forschungslaboratorium in Rüschlikon/Schweiz entwickelt wurde (Nobelpreis für Physik 1986). Das Rastertunnelmikroskop (RTM) hat erstmals die direkte Abbildung von atomaren Oberflächenstrukturen ohne Linsensystem ermöglicht (Ref. 3 der nachfolgenden Publikationsliste). Gleichzeitig konnte mit diesem Messinstrument die lokale Elektronenstruktur von Oberflächen mit atomarer Ortsauflösung studiert werden. Darüber hinaus wurde schon bald die Spitze eines solchen RTM dazu eingesetzt, gezielt einzelne Nanoobjekte zu adressieren und lokale physikalische Messungen daran durchzuführen. Das RTM nutzt dabei den Stromfluss von Elektronen zwischen einer atomar scharfen Spitze und einer zu untersuchenden Probe bei extrem kleinen Abständen von wenigen Atomdurchmessern - im sogenannten Tunnelbereich - um Informationen über nanoskalige und atomare Strukturen zu erhalten. Die Elektronen tragen sowohl eine elektrische Ladung als auch einen Spin; letzterer ist eng verknüpft mit den magnetischen Eigenschaften von Materialien. Während das von Binnig und Rohrer konzipierte Rastertunnelmikroskop die fließende elektrische Ladung zwischen Spitze und Probe detektiert, war lange Zeit die Frage offen, ob auch der Spinfreiheitsgrad der Elektronen genutzt werden kann, um zusätzlich magnetische Eigenschaften bis hinab zur atomaren Skala untersuchen zu können. Da dies von signifikanter Bedeutung für die magnetische Datenspeicherung und Bauelemententwicklung sein würde, haben sich in der zweiten Hälfte der achtziger Jahre entsprechend viele Wissenschaftler - sowohl an Universitäten als auch in industriellen Forschungslaboratorien - diesem Problem gewidmet.

Der erste Nachweis des Vakuumtunnels spinpolarisierter Elektronen in einem Rastertunnelmikroskop gelang Ende der achtziger Jahre Roland Wiesendanger - damals noch an der Universität Basel tätig - durch ein aufsehenerregendes Experiment, welches spezielle Sondenspitzen mit einem hohen Spinpolarisationsgrad mit einer intelligenten Wahl einer modellhaften magnetischen Probe kombinierte (Ref. 1 der Publikationsliste). Bereits zwei Jahre später gelang die Verbindung der magnetischen Sensitivität eines solchen spinpolarisierten RTMs mit einer Ortsauflösung im atomaren Bereich (Ref. 2). Nach dem Wechsel an die Universität Hamburg und dem Aufbau verbesserter RTM-Geräte, welche nun auch bis hinab zu extrem tiefen Temperaturen und hohen Magnetfeldern arbeiten konnten, ist es Roland Wiesendanger gemeinsam mit seiner Forschungsgruppe gelungen, eine Vielzahl weiterer magnetisch-sensitiver Messmethoden mit atomarer Ortsauflösung zu entwickeln. Zunächst gelang es, ein spektroskopisches spinabhängiges Messverfahren zu entwickeln, welches die detaillierte Untersuchung spinabhängiger Elektronenzustände bis hinab zur atomaren Skala ermöglicht. Durch magnetfeldabhängige RTM-Messungen konnte ein Verfahren der Nanomagnetometrie (Ref. 5) bis hin zur Einzelatom-Magnetometrie (Ref. 11 und 16) etabliert werden, welches in seiner Sensitivität alle anderen Magnetometrieverfahren um mindestens zwei Größenordnungen übertrifft. Eine weitere aufsehenerregende Entwicklung war die der magnetischen Austausch-Rasterkraftmikroskopie (Ref. 8), welche im Gegensatz zur spinpolarisierten Rastertunnelmikroskopie auch die magnetische Abbildung und Untersuchung von Isolatoren bis hinab zur atomaren Skala erlaubt.

Basierend auf diesen Entwicklungen einzigartiger Messmethoden zur Untersuchung magnetischer Eigenschaften auf atomarer Skala (Ref. 13) hat Roland Wiesendanger mit seiner Forschungsgruppe eine Reihe fundamental neuer Entdeckungen gemacht, welche Hamburg in den vergangenen Jahren zu einem weltweit anerkannten Zentrum der Magnetismusforschung gemacht haben. Beispielhaft können hier genannt werden:

- Der erste Nachweis antiferromagnetischer Ordnung in einem quasi-zweidimensionalen System einer einzelnen Atomlage Mangan auf einem Wolframsubstrat (Ref. 4).
- Die erste quantitative experimentelle Bestimmung der Ausdehnung des Kerns einer magnetischen Vortex-(Wirbel-)struktur (Ref. 6).

- Die erste Beobachtung atomar scharfer magnetischer Domänenwände in ultradünnen ferromagnetischen und antiferromagnetischen Filmen (Ref. 7).
- Die erste Beobachtung chiraler magnetischer Strukturen, wie beispielsweise Spinspiralen, in ultradünnen magnetischen Filmen (Ref. 9) und atomaren Ketten (Ref. 23).
- Der erste experimentelle Nachweis der Richtungsabhängigkeit der indirekten (RKKY-) Austauschwechselwirkung auf atomarer Skala (Ref. 14).
- Die Entdeckung eines magnetischen Skyrmionengitters (eine periodische Anordnung magnetischer Knoten) in einer Atomlage Eisen auf einem Iridiumsubstrat (Ref. 18).
- Die erstmalige direkte Abbildung der verschiedenen Spinkomponenten eines einzelnen Molekülorbitals (Ref. 20).
- Die Entdeckung einer Spinabhängigkeit der Reibung auf atomarer Skala (Ref. 24).
- Die erstmalige direkte Beobachtung der Spindynamik einzelner Quantenmagnete bestehend aus wenigen Atomen (Ref. 25).
- Der erste Nachweis einer langreichweitigen Kopplung zwischen einzelnen magnetischen Molekülen über ein magnetisches Skyrmionengitter (Ref. 27).

Neben diesen fundamentalen Beiträgen zur Grundlagenforschung hat Roland Wiesendanger gemeinsam mit seiner Forschungsgruppe bereits die Anwendungsperspektiven atomarer und molekularer magnetischer Strukturen für zukünftige magnetische Speicher- und Bauelementkonzepte anhand einer Reihe eindrucksvoller Beispiele aufzeigen können. Besonders hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang:

- Die erstmalige Demonstration eines rein spinbasierten Logik-Bauelements auf atomarer Skala (Ref. 17). Dieses basiert auf der Kombination der spinpolarisierten Rastertunnelmikroskopie mit dem Verfahren der Einzelatommanipulation, welches Anfang der neunziger Jahre erstmals durch Don Eigler und Mitarbeiter am IBM Forschungslaboratorium in San José etabliert werden konnte. Herr Wiesendanger und seiner Forschungsgruppe ist es erstmals gelungen, die spinabhängige Abbildung und die Einzelatommanipulation zusammenzuführen (Ref. 15) und damit sowohl maßgeschneiderte Modellmagnete (Ref. 19, 25 und 29) als auch atomare spinbasierte Bauelementstrukturen zu realisieren (Ref. 17).
- Die erstmalige Demonstration des "Schreibens" und "Löschens" einzelner magnetischer Skyrmionen (Knoten) in einer ultradünnen magnetischen Schichtstruktur (Ref. 26, 28 und 30). Dies geschieht mit Hilfe der Injektion eines lokalen Spinstroms aus der atomar scharfen Spitze eines spinpolarisierten RTMs, wie es bereits zuvor anhand der lokalen Ummagnetisierung einfacherer ferromagnetischer Nanostrukturen durch Roland Wiesendanger und seiner Forschungsgruppe demonstriert werden konnte (Ref. 10). Die magnetischen Knoten ("Skyrmionen") sind zwar um einen Faktor 10 größer (ca. 3 nm) als einzelne Atome (ca. 0.3 nm), haben jedoch für Anwendungen den entscheidenden Vorteil einer höheren Stabilität gegenüber Störungen (Defekte, Temperatur u.a.).

Neben diesen fundamentalen und anwendungsrelevanten Forschungsbeiträgen zum Magnetismus befasst sich Roland Wiesendanger gemeinsam mit seiner Arbeitsgruppe mit einer Reihe weiterer fundamentaler Fragen der nanowissenschaftlichen Forschung sowohl im Bereich der Physik als auch an der Schnittstelle zur Chemie. Beispielhaft können hier folgende weitere signifikante wissenschaftliche Beiträge genannt werden:

- Fundamentale Untersuchungen zu niederdimensionalen Elektronensystemen (Quantendots, Quantendrähte und 2D-Elektronensysteme) in III-V-Halbleitern mittels Rastertunnel-Spektroskopie.
- Mikroskopische Untersuchungen an diversen Kohlenstoff-basierten Materialsystemen (Graphit, Graphit-Einlagerungsverbindungen, Fullerene, Kohlenstoff-Nanoröhren, Graphen, u.a., siehe z.B. Ref. 12).
- Fundamentale Untersuchungen zur neuen Materialklasse der "Topologischen Isolatoren".
- Fundamentale Studien zur Oberflächenstruktur und des Wachstums ultradünner Schichten sowie lateraler Nanostrukturen.
- Mikroskopische Untersuchungen an Einzelmolekülen und Molekülschichten auf Oberflächen (z. B. Ref. 20, 21, 22, 27).
- Mikroskopische Untersuchungen an konventionellen und unkonventionellen Supraleitern.

Das aktuelle Forschungsinteresse von Roland Wiesendanger konzentriert sich weiterhin sowohl auf fundamentale Grundlagenforschung als auch auf die anwendungsorientierte Forschung:

Im Forschungsbereich atomarer und molekularer magnetischer Strukturen konnten in den vergangenen 20 Jahren viele neue fundamentale Erkenntnisse gewonnen werden, welche von unterschiedlichen magnetischen Wechselwirkungen auf atomarer Ebene bis hin zur Entdeckung neuer komplexer dreidimensionaler Spinstrukturen in einfachen Übergangsmetallschichten reichen.

Besonders die Entdeckung nanoskaliger magnetischer Skyrmionen und deren Manipulierbarkeit mit lokalen Spinströmen haben ein extrem hohes Anwendungspotential im Hinblick auf zukünftige magnetische Speicher und neue Bauelemente der Spintronik. Für die technologische Nutzung solcher Skyrmionen steht die Suche nach Schichtsystemen, welche solche komplexen Spinstrukturen auch bei Raumtemperatur ausbilden, im Vordergrund des Interesses. Auf Grund der Verfügbarkeit atomar auflösender magnetischer Mikroskopiemethoden, wie der spinabhängigen Rastertunnelmikroskopie und der magnetischen Austauschkraft-Mikroskopie, in Kombination mit der Möglichkeit des auf atomarer Ebene kontrollierten Wachstums ultradünner Schichten und lateraler Nanostrukturen, ist die Hamburger Forschungsgruppe hier in einer hervorragenden Position, um eine neue Generation magnetischer Datenspeicher zu entwickeln. Dabei ist nicht nur die extrem geringe Dimension einzelner Skyrmionen für Anwendungen interessant, sondern insbesondere die einfache Manipulierbarkeit von Skyrmionen durch Spinströme. Damit können nicht nur Datenspeicherkapazitäten erhöht werden, sondern es werden gleichzeitig extrem energieeffiziente Bauelemente der Spintronik mit einer sehr geringen Leistungsaufnahme ermöglicht.

Eine der größten Herausforderungen der modernen Festkörperphysik und -chemie ist die Suche nach einem Material, welches bei Raumtemperatur supraleitende Eigenschaften zeigt, d.h. den elektrischen Strom verlustfrei leitet. Dies könnte einen wesentlichen Beitrag zur Lösung des Energieproblems liefern. Nach der Entdeckung der sogenannten Kupratsupraleiter durch Müller und Bednorz (Nobelpreis für Physik 1987) mit Übergangstemperaturen in den supraleitenden Zustand von knapp 150 K (ca. -122°C) war die Euphorie groß, dass man dies zeitnah erreichen können wird. Die Fortschritte in den vergangenen 25 Jahren waren jedoch weit geringer als man dies zunächst erwartete. Die meisten Wissenschaftler sind heutzutage davon überzeugt, dass der Spinfreiheitsgrad eine entscheidende Rolle für den Mechanismus der Supraleitung bei relativ hohen Temperaturen spielt. Umso bedeutsamer wären Untersuchungen an Modellsystemen, welche bei atomarer Ortsauflösung Elektronen- und Spinstruktur gleichermaßen erfassen könnten. Es ist daher das Ziel aktueller Forschungsarbeiten von Roland Wiesendanger und seiner Arbeitsgruppe, die selbst entwickelten Methoden der spinpolarisierten Rastertunnelmikroskopie und der magnetischen Austauschkraft-Mikroskopie auf unkonventionelle Supraleiter-Materialien anzuwenden, um damit ein besseres Verständnis der Bedingungen, welche zu einer signifikanten Erhöhung der supraleitenden Übergangstemperatur führen könnten, zu erarbeiten. Darüber hinaus sollen Methoden, welche bereits zur Untersuchung der fundamentalen magnetischen Wechselwirkungen (direkte Austausch-, indirekte Austausch-Wechselwirkung, Dzyaloshinskii-Moriya-Wechselwirkung, biquadratische Wechselwirkung, Vierspin-Wechselwirkung etc.) auf atomarer Ebene entwickelt und erfolgreich zur Demonstration des Aufbaus künstlicher Nanomagnete sowie atomarer Spin-Logik-Bauelemente angewendet wurden, nun auch auf supraleitende Materialien übertragen werden. Ziel ist dabei, ein grundlegendes Verständnis der elektronischen und spinabhängigen Wechselwirkungen sowie deren Einfluss auf die Supraleitung auf atomarer Ebene zu gewinnen.

Ein weiteres, hoch spannendes Forschungsthema, mit welchem sich Herr Wiesendanger mit seiner Arbeitsgruppe in Kooperation mit Hamburger Forschungsgruppen der Laserphysik sowie der Theorie derzeit beschäftigt, ist die Kopplung nanoskaliger mechanischer Systeme mit ultrakalten Quantengasen. Quantenoptische Experimente sind bekannt für ihre extrem hohe Präzision, während festkörperartige Strukturen die Basis für die Informations- und Kommunikationstechnologie liefern. Die Kopplung solcher Systeme ist sowohl von hohem grundlagenphysikalischem Interesse, im Hinblick auf die Untersuchung eines kohärenten hybriden Quantensystems, als auch im Hinblick auf potentielle Anwendungen im Bereich der Quanteninformationsverarbeitung. Derzeit entsteht in Hamburg eine weltweit einmalige Forschungsapparatur, welche es erlaubt, einen festkörperartigen Resonator, gekühlt auf 30 Millikelvin, mit einem sogenannten Bose-Einstein-Kondensat zu koppeln. Hierzu wird von Seiten der Forschungsgruppe von Herrn Wiesendanger die langjährige Expertise im Bereich der nanomechanischen Oszillatoren bei ultratiefen Temperaturen und im Ultrahochvakuum, wie sie erfolgreich und äußerst eindrucklich durch die weltweit viel beachtete Realisierung der magnetischen Austauschkraft-Mikroskopie (Ref. 8) demonstriert wurde, eingebracht.

Schließlich existieren vielfältige interdisziplinäre Forschungsaktivitäten in der Arbeitsgruppe von Roland Wiesendanger im Bereich der molekularen Spintronik. Ziel ist dabei, ein zum atomaren Spin-Logik-Bauelement komplementäres, molekular basiertes Bauelement in enger Kooperation mit Forschungsgruppen der Chemie zu entwickeln, welches nicht mehr auf der Basis der Einzelatommanipulation, sondern auf Basis der molekularen Selbstorganisation hergestellt werden kann und auf Grund der signifikant höheren intramolekularen Spin-Wechselwirkungsenergien im Vergleich zu RKKY-Wechselwirkungsenergien potentiell auch bei Raumtemperatur funktionieren wird.

Auswahl von 30 zentralen Publikationen von Prof. Dr. Roland Wiesendanger

1. R. Wiesendanger, H.-J. Güntherodt, G. Güntherodt, R.J. Gambino, and R. Ruf,
Phys. Rev. Lett. 65, 247 (1990):
"Observation of vacuum tunneling of spin-polarized electrons with the scanning tunneling microscope".
2. R. Wiesendanger, I.V. Shvets, D. Bürgler, G. Tarrach, H.-J. Güntherodt, J.M.D. Coey, and S. Gräser,
Science 255, 583 (1992):
"Topographic and magnetic-sensitive scanning tunneling microscopy study of magnetite".
3. R. Wiesendanger:
"Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy: Methods and Applications",
Cambridge University Press, Cambridge 1994.
4. S. Heinze, M. Bode, O. Pietzsch, A. Kubetzka, X. Nie, S. Blügel, and R. Wiesendanger,
Science 288, 1805 (2000):
"Real-space imaging of two-dimensional antiferromagnetism on the atomic scale".
5. O. Pietzsch, A. Kubetzka, M. Bode, and R. Wiesendanger,
Science 292, 2053 (2001):
"Observation of magnetic hysteresis at the nanometer scale by spin-polarized scanning tunneling spectroscopy".
6. A. Wachowiak, J. Wiebe, M. Bode, O. Pietzsch, M. Morgenstern, and R. Wiesendanger,
Science 298, 577 (2002):
"Internal spin structure of magnetic vortex cores observed by spin-polarized scanning tunneling microscopy".
7. M. Bode, E. Y. Vedmedenko, K. von Bergmann, A. Kubetzka, P. Ferriani, S. Heinze, and R. Wiesendanger,
Nature Materials 5, 477 (2006):
"Atomic spin structure of antiferromagnetic domain walls".
8. U. Kaiser, A. Schwarz, and R. Wiesendanger,
Nature 446, 522 (2007):
"Magnetic Exchange Force Microscopy with atomic resolution".
9. M. Bode, M. Heide, K. von Bergmann, P. Ferriani, S. Heinze, G. Bihlmayer, A. Kubetzka, O. Pietzsch, S. Blügel, and R. Wiesendanger,
Nature 447, 190 (2007):
"Chiral magnetic order at surfaces driven by inversion asymmetry".
10. S. Krause, L. Berbil-Bautista, G. Herzog, M. Bode, and R. Wiesendanger,
Science 317, 1537 (2007):
"Current-induced magnetization switching with a spin-polarized scanning tunneling microscope".
11. F. Meier, L. Zhou, J. Wiebe, and R. Wiesendanger,
Science 320, 82 (2008):
"Revealing magnetic interactions from single-atom magnetization curves".
12. M. Ashino, D. Obergfell, M. Haluska, S. Yang, A. N. Khlobystov, S. Roth, and R. Wiesendanger,
Nature Nanotechnology 3, 337 (2008):
"Atomically resolved mechanical responses from individual metallofullerene molecules confined inside carbon nanotubes".
13. R. Wiesendanger,
Rev. Mod. Phys. 81, 1495 (2009):
"Spin mapping at the nanoscale and atomic scale".

14. L. Zhou, J. Wiebe, S. Lounis, E. Vedmedenko, F. Meier, S. Blügel, P. H. Dederichs, and R. Wiesendanger,
Nature Physics 6, 187 (2010):
"Strength and directionality of surface RKKY-interaction mapped on the atomic scale".
15. D. Serrate, P. Ferriani, Y. Yoshida, S.-W. Hla, M. Menzel, K. von Bergmann, S. Heinze, A. Kubetzka, and R. Wiesendanger,
Nature Nanotechnology 5, 350 (2010):
"Imaging and manipulating the spin direction of individual atoms".
16. A. A. Khajetoorians, B. Chilian, J. Wiebe, S. Schuwalow, F. Lechermann, and R. Wiesendanger,
Nature 467, 1084 (2010):
"Detecting excitation and magnetization of individual dopants in a semiconductor".
17. A. A. Khajetoorians, J. Wiebe, B. Chilian, and R. Wiesendanger,
Science 332, 1062 (2011):
"Realizing all-spin based logic operations atom by atom".
18. S. Heinze, K. von Bergmann, M. Menzel, J. Brede, A. Kubetzka, R. Wiesendanger, G. Bihlmayer, and S. Blügel,
Nature Physics 7, 713 (2011):
"Spontaneous atomic-scale magnetic skyrmion lattice in two dimensions".
19. A. A. Khajetoorians, J. Wiebe, B. Chilian, S. Lounis, S. Blügel, and R. Wiesendanger,
Nature Physics 8, 497 (2012):
"Atom-by-atom engineering and magnetometry of tailored nanomagnets".
20. J. Schwöbel, Y. Fu, J. Brede, A. Dilullo, G. Hoffmann, S. Klyatskaya, M. Ruben, and R. Wiesendanger,
Nature Communications 3, 953 (2012):
"Real-space observation of spin-split molecular orbitals of adsorbed single-molecule magnets".
21. A. DiLullo, S.-H. Chang, N. Baadji, K. Clark, J.-P. Klöckner, M.H. Prosenc, S. Sanvito, R. Wiesendanger, G. Hoffmann, and S.-W. Hla,
Nano Lett. 12, 3174 (2012):
"Molecular Kondo chain".
22. Y. Fu, J. Schwöbel, S.-W. Hla, A. Dilullo, G. Hoffmann, S. Klyatskaya, M. Ruben, and R. Wiesendanger,
Nano Lett. 12, 3931 (2012):
"Reversible chiral switching of Bis(phthalocyaninato) Terbium(III) on a metal surface".
23. M. Menzel, Y. Mokrousov, R. Wieser, J. E. Bickel, E. Vedmedenko, S. Blügel, S. Heinze, K. von Bergmann, A. Kubetzka, and R. Wiesendanger,
Phys. Rev. Lett. 108, 197204 (2012):
"Information transfer by vector spin chirality in finite magnetic chains".
24. B. Wolter, Y. Yoshida, K. von Bergmann, A. Kubetzka, S.-W. Hla, and R. Wiesendanger,
Phys. Rev. Lett. 109, 116102 (2012):
"Spin friction observed on the atomic scale".
25. A. A. Khajetoorians, B. Baxevanis, Ch. Hübner, T. Schlenk, S. Krause, T. Wehling, S. Lounis, A. Lichtenstein, D. Pfannkuche, J. Wiebe, and R. Wiesendanger,
Science 339, 55 (2013):
"Current-driven spin dynamics of artificially constructed quantum magnets".
26. N. Romming, Ch. Hanneken, M. Menzel, J. E. Bickel, B. Wolter, K. von Bergmann, A. Kubetzka, and R. Wiesendanger,
Science 341, 636 (2013):
"Writing and deleting single magnetic skyrmions".
27. J. Brede, N. Atodiresei, V. Caciuc, M. Bazarnik, A. Al-Zubi, S. Blügel, and R. Wiesendanger,
Nature Nanotechnology 9, 1018 (2014):
"Long-range magnetic coupling between nanoscale organic-metal hybrids mediated by a nanoskyrmion lattice".

28. J. Hagemester, N. Romming, K. von Bergmann, E. Y. Vedmedenko, and R. Wiesendanger, **Nature Communications** 6, 8455 (2015):
"Stability of single skyrmionic bits".
29. A. A. Khajetoorians, M. Valentyuk, M. Steinbrecher, T. Schlenk, A. Shick, J. Kolezenc, A. I. Lichtenstein, T. O. Wehling, R. Wiesendanger, and J. Wiebe, **Nature Nanotechnology** 10, 958 (2015):
"Tuning emergent magnetism in a Hund's impurity".
30. Ch. Hanneken, F. Otte, A. Kubetzka, B. Dupé, N. Romming, K. von Bergmann, R. Wiesendanger, and S. Heinze, **Nature Nanotechnology** 10, 1039 (2015):
"Electrical detection of magnetic skyrmions by tunnelling non-collinear magnetoresistance".