Mikroskopische Datenrettung mit Magnetkraftmikroskopie (MFM) bei schwersten Festplatten-Schäden

Autor: Johannes Hoffmeister (Reverse Engineer, DATA REVERSE® Datenrettung)

1. **Abstract**
2. **Einleitung**
3. **Theoretische Grundlagen der Magnetkraftmikroskopie**
   3.1. Funktionsprinzip und Messmechanismus
   3.2. Auflösung und Grenzen
   3.3. Datendekodierung aus MFM-Bildern
4. **Praktische Herausforderungen: Schwerste Schäden und Umwelteinflüsse**
   4.1. Mechanische Zerstörungen
   4.2. Chemische und biologische Einflüsse
   4.3. Entmagnetisierung und thermische Alterung
   4.4. Aufwand und Zeitfaktor
5. **MFM als „Werkzeug letzter Instanz“ in der Datenrettung**
   5.1. Theoretischer Nutzen und forensische Relevanz
   5.2. Typischer Ablauf eines MFM-Rettungsversuchs
6. **Datenrekonstruktion und Dekodieralgorithmen**
7. **Fallbeispiel: Platte von einer Deponie**
   7.1. Ausgangssituation
   7.2. Realistische Aussichten
   7.3. Kosten-Nutzen-Verhältnis
8. **Zukunftsperspektiven**
9. **Fazit**
10. **Literatur (Auswahl)**
11. **Schlussbemerkung**

Abstract

In der modernen Informationstechnologie zählt die Festplatte (HDD) nach wie vor zu den wichtigsten Speichermedien für große Datenmengen. Für gewöhnlich ist die Rekonstruktion verlorener oder beschädigter Daten mit etablierten Methoden – zum Beispiel Austausch defekter Bauteile oder Wiederherstellung im Reinraum – erfolgreich. In Extremsituationen jedoch, etwa bei Festplatten, die über zehn Jahre ungeschützt auf einer Müllhalde gelagert und dabei massiven mechanischen, chemischen und klimatischen Einflüssen ausgesetzt waren, stoßen konventionelle Verfahren an ihre Grenzen. Hier rückt ein hochauflösendes, mikroskopisches Verfahren in den Fokus: die Magnetkraftmikroskopie (MFM). Diese Methode macht die Magnetisierungsstrukturen auf der Oberfläche des Speichermediums sichtbar und erlaubt so im Prinzip – zumindest auf theoretischer Ebene – die Rekonstruktion einzelner Bits.

Die vorliegende Arbeit beleuchtet das Verfahren der MFM aus wissenschaftlicher Sicht und diskutiert dessen Potenzial, aber auch die vielfältigen praktischen Herausforderungen, die eine Rekonstruktion tatsächlich limitieren. Im ersten Teil werden die theoretischen Grundlagen der Magnetkraftmikroskopie erläutert sowie deren Anwendung im Kontext der Datenrettung vorgestellt. Anschließend werden die typischen Schadensszenarien mechanisch schwer geschädigter Festplatten analysiert, besonders unter extremen Umweltbedingungen (z. B.

Lagerung auf einer Deponie). Daran anknüpfend wird diskutiert, wie Datenrekonstruktion aus diesen MFM-Bildern prinzipiell abläuft, und warum sie in der Praxis nur selten gelingt. Abschließend werden mögliche Zukunftsperspektiven aufgezeigt, die eine mikroskopische Datenrettung ggf. verbessern könnten.

Die Erkenntnisse dieser Arbeit belegen, dass MFM zwar eine faszinierende Option darstellt, die im Labor Kontrastbilder magnetischer Strukturen liefern kann, jedoch für eine umfangreiche Datenrettung von stark beschädigten Festplatten zurzeit kaum praktikabel ist. Verbesserte Sensoren, fortschrittliche Automatisierungsansätze sowie intelligente Rekonstruktions- und Dekodieralgorithmen könnten die Erfolgschancen in Zukunft jedoch erhöhen.

1. Einleitung

Die Bedeutung digitaler Daten ist in den letzten Jahrzehnten exponentiell gestiegen. Privatpersonen wie auch Unternehmen speichern riesige Datenmengen – von sensiblen Geschäftsunterlagen über persönliche Fotos bis hin zu global genutzten Cloud-Services. Trotz der zunehmenden Verbreitung von SSDs (Solid-State-Drives) nimmt die klassische Festplatte (HDD) nach wie vor eine zentrale Rolle als Haupt- oder Massenspeicher in Servern, NAS-Systemen und Desktop-Rechnern ein. Festplatten sind vergleichsweise robust und preiswert pro Gigabyte, ihre Mechanik und Magnetoberfläche sind jedoch anfällig für Verschleiß und Unfälle.

In der gängigen Datenrettungspraxis werden physisch oder logisch beschädigte HDDs in spezialisierten Laboren untersucht und repariert. Typische Verfahren umfassen beispielsweise:

- **Austausch der Elektronik** (Platine) bei Ausfällen des Festplatten-Controllers.
- **Reinraum-Arbeiten** zum Austausch der Schreib-/Leseköpfe und zur Reparatur oder Transplantation der Platten selbst.
- **Software-Methoden** zur Wiederherstellung von Dateisystemstrukturen bei logischen Fehlern.

In der Regel führen diese Techniken zum Erfolg, sofern die Plattenoberfläche noch intakt und die Magnetisierung nicht irreversibel zerstört ist. Anders stellt sich die Lage dar, wenn eine Festplatte massiven mechanischen oder chemischen Einflüssen ausgesetzt war, beispielsweise durch einen Brand, einen massiven Headcrash oder eine jahrelange Lagerung in widrigen Umgebungen (z. B. in einer Müllhalde, in feuchten Kellern, unter Trümmern etc.). Wird der Magnetbelag der Platte teilweise abgetragen, stark verkratzt oder chemisch korrodiert, sind herkömmliche Reparaturansätze oft machtlos.

Diese Extremfälle haben zu der Frage geführt, ob es möglich ist, mithilfe hochauflösender mikroskopischer Methoden doch noch Datenfragmente zu rekonstruieren. In diesem Kontext wird häufig das **Magnetkraftmikroskop (MFM)** genannt. Als hochspezialisierte Form des Rasterkraftmikroskops kann MFM prinzipiell die magnetischen Domänen (Bitmuster) auf der Plattenoberfläche sichtbar machen – und das sogar in Regionen, in denen die eigentliche mechanische Leseeinheit einer Festplatte bereits versagt. Theoretisch lässt sich somit jedes Bit (bzw. dessen magnetische Orientierung) analysieren, sofern das magnetische Signal noch intakt ist.

Der Haken dabei: Die praktische Umsetzung ist mit enormem Aufwand und vielen Unsicherheiten verbunden. Denn eine mikroskopische Datenrettung setzt eine nahezu intakte oder zumindest verwertbare Magnetisierungsstruktur voraus. Weiterhin muss der gewonnene

Datensatz anschließend dekodiert und zu verwertbaren Dateien zusammengesetzt werden. Gerade bei einem modernden Datenträger, der jahrelang feucht und stark belastet gelagert wurde, wird dies zum Kampf gegen diverse physikalische, chemische und geometrische Schäden.

Ziel dieser Abhandlung ist es, einen realistischen Überblick zu geben, inwieweit MFM bei schwerst geschädigten Festplatten helfen kann, welche praktischen Herausforderungen damit verbunden sind und welche Perspektiven sich für die Zukunft ergeben. Dabei wird auf aktuelle Forschungsergebnisse verwiesen und die Machbarkeit anhand realer Annahmen kritisch bewertet. So soll eine fundierte Einschätzung entstehen, ob MFM künftig eine feste Größe in der Datenrettung bei Extremszenarien werden kann oder ob sie – wie heute – nur eine theoretische Option mit sehr engen Grenzen bleibt.

2. Theoretische Grundlagen der Magnetkraftmikroskopie

2.1 Funktionsprinzip und Messmechanismus

Die Magnetkraftmikroskopie (MFM) ist ein spezielles Abbildungsverfahren der Rastersondenmikroskopie, das magnetische Feldgradienten auf einer Probenoberfläche mit hohem lateralem Auflösungsvermögen erfasst. Technisch basiert MFM auf einem konventionellen **Rasterkraftmikroskop (AFM)**, bei dem eine extrem feine Spitze (Cantilever) in sehr geringem Abstand über der Probenoberfläche geführt wird. An der Spitze befindet sich eine magnetische Beschichtung oder eine magnetisierte Spitze, die mit den lokalen Magnetfeldern der Probe wechselwirkt.

Der Cantilever schwingt in der Regel in Resonanzfrequenz (Tapping Mode oder Non-Contact Mode). Durch die magnetische Wechselwirkung ändert sich die Frequenz oder Phase dieser Schwingung leicht, sobald die Spitze über einen Bereich mit anderer Magnetisierung gelangt. Mittels hochauflösender Elektronik werden diese Frequenz- bzw. Phasenverschiebungen in ein Bildsignal umgerechnet, das die Verteilung der magnetischen Domänen auf der Probenoberfläche darstellt. Die Kontraste im MFM-Bild resultieren überwiegend aus den Übergängen benachbarter Magnetisierungsrichtungen, weshalb insbesondere an magnetischen Grenzbereichen ein hoher Kontrast zu sehen ist.

2.2 Auflösung und Grenzen

Die laterale Auflösung von MFM liegt in der Größenordnung von 10–30 Nanometern, je nach Qualität der Spitze und gewähltem Messmodus. Um eine Festplattenoberfläche zu analysieren, in deren Oberfläche Bits im Submikrometer- oder Nanobereich geschrieben sind, ist eine sehr hohe Auflösung zwingend erforderlich. Moderne Festplatten erreichen areale Aufzeichnungen jenseits von 1 Tbit/in^2, was die Bitlänge und Bitbreite auf wenige Dutzend Nanometer reduziert. Damit ist MFM an der Grenze dessen, was experimentell noch aufgelöst werden kann. Bei älteren Festplattenformaten (z. B. aus den 1990er- und 2000er-Jahren), die deutlich größere Bitzellen verwenden, ist die Auflösung von MFM besser ausreichend.

Limitierend ist außerdem die Eindringtiefe der magnetischen Spitzenwechselwirkung. MFM misst nicht nur die Oberfläche, sondern erfasst in gewissem Maße auch magnetische Felder aus tieferen Schichten. Für das Verständnis der Festplattenstruktur gilt allerdings, dass die magnetische Schicht meist sehr dünn ist (typisch unter 20–30 nm), sodass in der Praxis die aufgezeichneten Domains weitgehend an der Oberfläche liegen. Die Signalstärke nimmt jedoch rasch ab, wenn die Schicht beschädigt oder abgeschliffen wurde.

2.3 Datendekodierung aus MFM-Bildern

Im Kontext einer Datenrettung ist das eigentliche MFM-Bild nur ein Zwischenschritt. Man erhält typischerweise ein 2D-Kontrastbild, in dem helle und dunkle Linien die Übergänge zwischen magnetischen Domänen markieren. Um dieses Bild in verwertbare Binärdaten umzuwandeln, müssen Algorithmen eingesetzt werden, die:

1. Die Spuren oder Spurradien identifizieren (z. B. konzentrische Kreise bei einer HDD).
2. Die magnetischen Übergänge (Wechsel von 1 auf 0 oder umgekehrt) lokalisieren.
3. Das jeweilige Kodierungsschema der Festplatte berücksichtigen (z. B. Run Length Limited, PRML-Verfahren).
4. Fehlerkorrektur und Neu-Synchronisation durchführen, sofern möglich.

Erst wenn daraus eine konsistente Bitfolge extrahiert wurde, kann man die Daten mithilfe bekannter Dateisysteme (FAT, NTFS, EXT usw.) oder Low-Level-Rettungssoftware rekonstruieren. Dieser Prozess ist äußerst rechen- und wissensintensiv, da man im Vergleich zum konventionellen Auslesen keinen automatischen, hardwareseitigen Lesekanal (Read Channel) hat.

3. Praktische Herausforderungen: Schwerste Schäden und Umwelteinflüsse

3.1 Mechanische Zerstörungen

Typische Extremszenarien umfassen:

- **Starke Kratzer** durch Headcrash: Teile der Magnetoberfläche sind physisch abgetragen, sodass Information unwiederbringlich verloren ist.
- **Verbogene Platten**: Insbesondere wenn sie hohen Kräften ausgesetzt wurden, kann sich die ursprünglich plane Festplatte verformen. In der Folge wird es schwierig, die Platte in einem Mikroskop stabil zu positionieren.
- **Gebrochene Platten** (v. a. Glas-Platter): Zerbrochene Scheiben liegen in Fragmenten vor, die man mühsam zusammensetzen müsste, um überhaupt eine Spurrekonstruktion versuchen zu können.

Im Fall von jahrelanger Lagerung auf einer Deponie kommt es zu zusätzlichen Deformationen, da die Festplatte möglicherweise zusammengepresst wurde. Solche Kompression kann zu Brüchen und zur Ablösung der obersten Schutzschicht führen.

3.2 Chemische und biologische Einflüsse

Auf einer Müllhalde wirken Feuchtigkeit, Schmutz, Mikroorganismen und chemische Substanzen auf den Datenträger ein. Das Gehäuse einer Festplatte bietet bei intaktem Zustand zwar eine gewisse Barriere, doch schon ein kleines Leck oder ein mechanisch zerstörtes Gehäuse kann das Eindringen von Wasser und Partikeln ermöglichen. Über Jahre hinweg können Korrosion, Oxidation sowie Ablagerungen die Magnetoberfläche stark angreifen. Das resultiert in:

- **Oxidation** der Magnetbeschichtung (z. B. Kobaltlegierungen).
- **Korrosion** von Aluminium- oder Stahlteilen, die auf die Plattenoberfläche gelangen.
- **Pilz- und Bakterienwachstum** (in feucht-organischem Umfeld), das zusätzliche Substanzen (Säuren) erzeugen kann.

Sind diese korrosiven Prozesse weit fortgeschritten, wird die Magnetisierung an den betroffenen Stellen destabilisiert oder sogar vollständig zerstört. Die hochauflösende MFM kann in solchen Arealen keine sinnvolle Information mehr auslesen.

3.3 Entmagnetisierung und thermische Alterung

Über lange Zeiträume hinweg kommt es zur sogenannten *thermisch aktivierten Magnetisierungsrelaxation*. Zwar sind Festplatten so ausgelegt, dass sie bei normalen Temperaturen mehrere Jahre bis Jahrzehnte ihre Magnetisierungszustände beibehalten (Stichwort „magnetische Stabilität“). Unter extremen Bedingungen (starke Temperaturschwankungen, Hitze, UV-Strahlung) kann dieser Effekt jedoch beschleunigt werden, sodass die Domains ihre ursprüngliche Ausrichtung partiell verlieren. In der Folge ist eine eindeutige Bit-Differenzierung nicht mehr gegeben.

3.4 Aufwand und Zeitfaktor

Anders als bei der konventionellen Festplattenwiederherstellung ist der Zeitaufwand beim MFM-Scan immens. Ein Rastersondenmikroskop arbeitet mit einem Zeilen-für-Zeilen-Scan; je höher die gewünschte Auflösung, desto langsamer der Prozess. Sollen weite Bereiche einer 3,5-Zoll-Platte (Fläche von rund 70–90 Quadratzentimetern) im Nanometermaßstab gescannt werden, können dafür Wochen, Monate oder gar Jahre veranschlagt werden. Entsprechend ist eine Vollabdeckung der gesamten Oberfläche unrealistisch. MFM würde sich in der Praxis höchstens auf besonders relevante Ausschnitte konzentrieren, in denen man wichtige Datei-Fragmente vermutet.

4. MFM als „Werkzeug letzter Instanz“ in der Datenrettung

4.1 Theoretischer Nutzen und forensische Relevanz

In der Datenforensik wird MFM gelegentlich als „ultima ratio“ beschrieben, um angeblich selbst überschriebenen oder formatierten Daten nachzuspüren. Tatsächlich basierte diese Vorstellung auf frühen Forschungsarbeiten (z. B. Peter Gutmann, 1996), die nahelegten, dass man mit hochauflösenden Techniken alte Restmagnetisierung auslesen könne. Spätere Studien haben jedoch empirisch nachgewiesen, dass selbst bei nur einmaligem Überschreiben moderner Festplatten die Wiederherstellung konkreter Dateninhalte via MFM nahezu unmöglich ist.

Der wesentliche Grund ist, dass MFM zwar Grenzbereiche darstellen kann, aber die Signalstärke und Korrektheit für eine Rekonstruktion ganzer Dateien in den allermeisten Fällen nicht ausreicht. Trotzdem existieren Einzelfälle, in denen MFM in Laboren bestimmte alte Magnetisierungsfragmente sichtbar machte („Bit Shadows“), was zumindest eine Teilrekonstruktion kleiner Datenbereiche erlaubte. Allerdings wurde hierfür meist spezielles Equipment und viel Zeit investiert.

Für *extrem beschädigte Datenträger* könnte MFM in seltenen Situationen dennoch interessant sein. Beispielsweise wenn ein kriminaltechnisches Institut nur winzige, aber entscheidende Textfragmente (z. B. einen „E-Mail-Auszug“) aus einer stark zerstörten Festplatte benötigt und andere Methoden (klassisches Auslesen, Head-Swap) endgültig ausgeschlossen sind. In solchen Fällen kann man versuchen, einzelne Sektoren oder gar nur Sektorfragmente mit MFM zu untersuchen, in der Hoffnung, daraus noch lesbare Bitmuster zu gewinnen. Dies ist jedoch eher eine forensische Spezialaufgabe und keinesfalls eine „Standardmethode“ im Datenrettungsalltag.

4.2 Typischer Ablauf eines MFM-Rettungsversuchs

1. **Sicherung und Reinigung**: Zunächst müssen alle sichtbaren Schmutz- und Korrosionsschichten unter laborähnlichen Bedingungen so weit wie möglich entfernt werden, ohne weitere Oberflächenzerstörung zu riskieren. Eine zu grobe Reinigung könnte die magnetische Schicht abreiben oder weiter beschädigen.

2. **Segmentierung der Platte**: Wenn die Platte stark verzogen oder zerbrochen ist, wird man möglicherweise Teilstücke heraustrennen, um sie plan auf einem Probenträger fixieren zu können. Je kleiner das Segment, desto einfacher lässt es sich in das MFM einspannen.

3. **Erst-Scan**: Ein hochauflösender MFM-Scan eines kleinen Areals erfolgt. Dabei wird getestet, ob noch verwertbare magnetische Übergänge sichtbar sind. Ist das Bild nur verrauscht oder korrodiert, kann das Projekt ggf. abgebrochen werden.

4. **Datentransfer in Bitfolgen**: Sind Spuren noch zu erkennen, müssen diese in einer Software analysiert werden. Hierbei spielt die Wahl eines passenden Signalverarbeitungsalgorithmus eine entscheidende Rolle. Je nach Festplattentyp kann das Spurformat unterschiedlich sein.

5. **Versuch der Dekodierung**: Das gewonnene Signal wird dekodiert (z. B. PRML-ähnliche Algorithmen), und man sucht nach Sektorsignaturen, ECC-Blöcken und möglichen Dateisystemstrukturen.

6. **Rekonstruktion und Validierung**: Können einzelne Sektoren erkannt werden, versucht man, daraus sinnvolle Datenfragmente zu bilden (z. B. Textdateien, Header bekannter Formate).

Wenn in diesem Prozess an irgendeiner Stelle keine verwertbaren Daten auftreten, endet das Projekt. Jede Phase ist zeitaufwendig und erfordert sehr spezielles Fachwissen über Festplattenaufbau, magnetische Messtechnik, Signalverarbeitung und Datenrettung. Für kommerzielle Datenrettungsaufträge ist dies kostenseitig in der Regel unattraktiv.

5. Datenrekonstruktion und Dekodieralgorithmen

Die eigentliche Herausforderung bei einer MFM-gestützten Datenrettung liegt weniger in der Mikroskopie selbst als vielmehr in der anschließenden **Signalanalyse**. Festplatten codieren Bits nicht einfach als 1 oder 0, sondern verwenden komplexe Kodierungsschemata, die auf Toleranzen und effiziente Ausnutzung der magnetischen Fläche ausgelegt sind (z. B. Run Length Limited Codierung, Partial Response Maximum Likelihood, Low-Density Parity-Check Codes).

Diese technischen Hintergründe führen zu folgenden Problemen bei der Rekonstruktion:

1. **Positionsgenauigkeit**: Die Spuren einer Festplatte sind kreisförmig angeordnet. Entfernt man die Scheibe aus ihrem Laufwerksgehäuse, gehen Referenzpunkte verloren. Das MFM-Bild kann schief oder skaliert sein. Man benötigt also Algorithmen, die die Spurform mathematisch nachzeichnen und an die erwarteten Kreisbahnen anpassen. Schon kleinste Abweichungen können zu verlorener Spurtreue führen.

2. **Phasenverschiebungen**: Der Abstand zwischen zwei benachbarten Magnetisierungswechseln ist im Rohsignal nicht zwingend identisch, da es bei der Aufzeichnung Abweichungen geben kann oder die Platte sich bei der Aufnahme leicht verformt hat. Moderne Lesekanäle berücksichtigen solche Jitter-Effekte. Bei einem MFM-Bild müssten diese Variation ebenfalls softwareseitig kompensiert werden.

3. **Run-Length-Limited Codes**: Viele Festplatten setzen Beschränkungen ein (z. B. maximal n aufeinanderfolgende Nullbits), um die Takterkennung zu gewährleisten. Ob und in welcher Form diese Kodierung eingesetzt wurde, kann je nach HDD-Modell variieren. Wer Daten rekonstruieren möchte, muss das genaue Schema kennen oder Reverse Engineering betreiben.

4. **ECC und Fehlerkorrektur**: Auf Festplatten werden Datenblöcke (Sektoren) i. d. R. mit ECC (Error Correction Code) versehen, um Lesefehler auszugleichen. Ist das ECC-Schema unbekannt oder liegen zu viele Bitfehler vor, wird eine Rekonstruktion scheitern.

5. **Unvollständige Datensätze**: Selbst wenn einige Bereiche der Platte noch intakt sind, fehlen oft weite Teile. Man erhält dann nur Fragmente. Relevante Informationen könnten innerhalb der fehlenden Bereiche liegen und somit unwiederbringlich verloren sein.

In der Wissenschaft wurden verschiedene Ansätze diskutiert, um solche Probleme in den Griff zu bekommen. Spezielle Software kann beispielsweise automatisiert die in MFM-Bildern sichtbaren Streifenmuster interpretieren und daraus ein „Pseudo-Lesesignal“ ableiten. Dieses Signal versucht man dann ähnlich wie in einem echten HDD-Controller zu dekodieren. Erste Erfolge gab es mit älteren Festplatten, bei denen die Datendichte noch gering war. Für hochmoderne HDDs ist eine solche Rekonstruktion allerdings ungleich schwieriger bis unmöglich.

6. Fallbeispiel: HDD von einer Mülldeponie

6.1 Ausgangssituation

Angenommen, man findet eine Festplatte, die über zehn Jahre hinweg ungeschützt auf einer Mülldeponie gelagert war. Der Datenträger weist starke Korrosionsspuren auf, das Gehäuse ist deformiert und offen. Ein Headcrash hat zusätzlich große Kratzer auf der Oberfläche hinterlassen. Das Ziel wäre es, einzelne kritische Dokumente (z. B. verschollene Verträge) zu retten. Konventionelle Datenrettungsmethoden schlagen fehl, weil sich die Platte nicht mehr drehen lässt, Leseköpfe abgerissen sind und die Plattenoberfläche großflächig beschädigt ist.

6.2 Realistische Aussichten

Zunächst würde man untersuchen, ob überhaupt noch intakte Teilbereiche existieren. Sind alle Schichten stark korrodiert, ist die Magnetisierung womöglich gänzlich entwertet. Selbst wenn lokal noch etwas von der Magnetoberfläche erhalten ist, kann eine komplette Rekonstruktion ausgeschlossen werden. Am ehesten bestünde eine Chance, in winzigen, weniger beschädigten Flächen (z. B. in einem Randbereich) ein paar Sektoren auszulesen.

Man würde also gezielt den intaktesten Teil lokalisieren, diesen ausbauen, vorsichtig reinigen und plan in einem MFM platzieren. Ein Raster-Scan könnte dann Magnetisierungsübergänge aufzeigen – vorausgesetzt, sie wurden nicht thermisch oder chemisch gelöscht. Um jedoch daraus abgeleitete Daten zuverlässig zu erhalten, müsste ein ausgedehnter Prozess der Bildanalyse, Spurzuordnung und Dekodierung erfolgen. In vielen Fällen führt dies zu einem Mosaik aus Datenfragmenten oder völlig unlesbarem Rauschen.

6.3 Kosten-Nutzen-Verhältnis

Betrachtet man den extrem hohen Aufwand, das notwendige Spezialwissen und die Zeit für MFM-Scans und Datenrekonstruktion, ist dieser Weg wirtschaftlich kaum zu rechtfertigen. Nur wenn der Wert der potenziell zu rettenden Daten immens groß ist (z. B. in rechtlichen, kriminaltechnischen oder militärischen Kontexten) oder es sich um ein Projekt reinen Forschungsinteresses handelt, könnte man diesen Versuch unternehmen. Für gewöhnliche Datenrettungen ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis nicht vertretbar.

7. Zukunftsperspektiven

Trotz der beschriebenen Schwierigkeiten gibt es fortlaufende Forschungsansätze, die eine mikroskopische Datenrettung in Zukunft zumindest in Teilbereichen realistischer erscheinen lassen:

1. **Verbesserte Mikroskoptechniken**:
    - **Kelvin-Probe-Kraftmikroskopie (KPFM)** oder **Magneto-optische Methoden** könnten in Kombination mit MFM zusätzliche Informationen liefern.
    - **Spin-Stand-Methoden**: Spezielle Vorrichtungen rotieren eine ausgebaute HDD-Platte, während ein empfindlicher MR-Sensor oder GMR-Sensor (Giant Magnetoresistance) die magnetischen Signale ausließt. Dies geht schneller als ein Zeilen-Scan und ist eher mit dem realen Leseprozess verwandt.
2. **Automatisierte Bildverarbeitung und KI**:
    - Mit **Machine Learning**-Algorithmen könnte man MFM-Bilder analysieren, Rauschen unterdrücken und Muster erkennen, selbst wenn die Signalqualität schlecht ist. Solche Ansätze befinden sich jedoch erst in den Anfängen.
    - **Deep-Learning-Decodierung** könnte prinzipiell versuchen, stark verzerrte oder verrauschte Signale in Bits zu übersetzen, ohne die exakte Kodierungsstruktur zu kennen. Dies wäre in gewisser Hinsicht vergleichbar mit Bildrestaurierung oder Spracherkennung in verrauschten Audio-Daten.
3. **Neue Speichermedien und Fachwissen**:
    - Wenn magnetische Speichermedien weitere Entwicklungsstufen durchlaufen (z. B. HAMR – Heat-Assisted Magnetic Recording), könnte sich auch das Magnetmikroskopie-Verfahren verändern.
    - Bessere Dokumentation der internen Kodierungen und genauere Reverse-Engineering-Methoden könnten die Decodierung von MFM-Bildern vereinfachen.
4. **Kostenreduktion**:
    - Derzeit ist MFM-Equipment teuer und erfordert Experten. Mit einer breiteren Verfügbarkeit von Rasterkraftmikroskopen und automatisierten Scanning-Systemen könnte der finanzielle Aufwand sinken.

Ob sich diese Ansätze in absehbarer Zeit so weit entwickeln, dass eine MFM-basierte Datenrettung für Extremschäden gängige Praxis wird, ist zweifelhaft. Wahrscheinlicher ist, dass MFM ein hochspezialisiertes Forensik- und Forschungs-Tool bleibt, das nur in Ausnahmefällen eingesetzt wird.

8. Fazit

Die magnetkraftmikroskopische Untersuchung von Festplattenoberflächen ist ein faszinierendes Verfahren, das aufzeigt, wie sich theoretisch selbst stark beschädigte oder überschrieben geglaubte magnetische Signale visualisieren lassen. Gerade in der Forensik oder bei wissenschaftlichen Untersuchungen kann MFM daher spannende Einblicke in das

Innenleben von Speichermedien liefern. Dennoch sind die **praktischen Hürden** für eine umfassende Datenrettung enorm:

- Die **physikalischen Limitationen** (z. B. Auflösung, Streufelder, Entmagnetisierung) schränken ein, welche Informationen tatsächlich noch detektiert werden können.
- Die **mechanische und chemische Zerstörung** von Festplatten bei langer, unkontrollierter Lagerung führt oft zu irreparablen Substanzverlusten in der Magnetbeschichtung.
- Die **Dauer und Komplexität** des Scan-Vorgangs macht ein Abbilden ganzer Oberflächen im hohen Nanometerbereich weitgehend unpraktikabel.
- Die **Signalanalyse** ist hochkomplex und erfordert spezialisiertes Wissen, um die fragmentierten Bitmuster schließlich wieder zu rekonstruieren und zu decodieren.

In Summe ergibt sich das Bild, dass MFM im Labor zwar *technisch* Datenreste aufdecken kann, diese Methode aber selbst in ambitionierten Forschungsprojekten nur in seltenen Fällen zu einer vollständigen Rettung ganzer Dateien führt. Vielmehr ist es ein Nischenwerkzeug, das allenfalls **gezielte Fragmente** gewinnen kann – und das auch nur, wenn bestimmte Randbedingungen (z. B. zumindest teilweise intakte Magnetisierung) erfüllt sind.

Für den typischen Datenrettungsfall, etwa eine Festplatte mit Headcrash oder Elektronikdefekt, sind konventionelle Methoden im Reinraum oder über intelligente Software weitaus effektiver. MFM lohnt sich nur dann, wenn

1. alle konventionellen Maßnahmen versagen,
2. ein extrem hoher Wert der Daten oder forensischer Nutzen gegeben ist,
3. hinreichende Ressourcen (Zeit, Geld, Fachkompetenz) zur Verfügung stehen, um den aufwendigen Prozess durchzuführen.

Langfristig könnte die Entwicklung neuer magnetischer Mikroskopieverfahren, die eine höhere Datenerfassungsrate bieten, das Potenzial der mikroskopischen Datenrettung erhöhen. Auch fortschrittliche KI-Methoden können dazu beitragen, verrauschte magnetische Signale besser zu interpretieren. Dennoch wird das grundlegende Problem – nämlich oft irreversibel zerstörte oder fehlende Magnetstrukturen – bestehen bleiben.

Aus praktischer Sicht ist daher die **Vermeidung solch extremer Schäden** durch geeignete Lagerungs- und Sicherungsstrategien der mit Abstand zuverlässigere Weg. Regelmäßige Backups, redundante Speichersysteme und eine sachgerechte Entsorgung bzw. Lagerung sind entscheidend, um nicht auf derartige Rettungsaktionen angewiesen zu sein. Falls es jedoch einmal ein zwingendes Szenario geben sollte – wie z. B. bei polizeilichen Ermittlungen in einem hochbrisanten Fall – kann MFM als *Methode letzter Instanz* in Betracht gezogen werden, jedoch ohne Garantie auf Erfolg.

J. Hoffmeister, Stand: 11.01.2025

Literatur (Auswahl)

1. Gutmann, P. (1996): Secure Deletion of Data from Magnetic and Solid-State Memory. *Proceedings of the 6th USENIX Security Symposium*.
2. Wright, C., Kleiman, D., Sundhar R.S. (2007): Overwriting Hard Drive Data: The Great Wiping Controversy. *Proc. 3rd International Conference on Information Systems Security (ICISS)*.
3. Gomez, M. et al. (2000): Imaging of Overwritten Data using Magnetic Force Microscopy. *IEEE Transactions on Magnetics*, 36(5).
4. White, A. et al. (2013): Recovery of Inaccessible Hard Disk Data using Magnetic Force Microscopy. *Master's Thesis, University of California, San Diego*.
5. Gross, L., Mohn, F., Moll, N. et al. (2009): Measuring the Charge State of an Adatom with Noncontact Atomic Force Microscopy. *Science*, 324(5933). (Allgemeine AFM-Grundlage)
6. Martin, Y., Wickramasinghe, H.K. (1987): Magnetic imaging by "force microscopy" with 1000 Å resolution. *Applied Physics Letters*, 50(20). (Frühe MFM-Grundlage)
7. Cumpson, P., Portoles, J.F., Sano, N. et al. (2013): The Dependence of Microbial Degradation in Hard Disk Materials in Landfill Conditions. *Journal of Environmental Sciences*, 26(4).
8. Li, X., Cheng, K., Li, H. (2019): Research on the Mechanism of Hard Disk Platter Corrosion in Various Environments. *Surface and Interface Analysis*, 51(12).
9. Nishimura, N., Hirano, H., Tsujimura, M. (2012): Data Recovery from Non-Operational Hard Disks using Spin-Stand. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(5).
10. Henkel, S. (2019): Magnetic Surface Degradation in Aged HDDs. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 19(2).
11. Kurdi, S. et al. (2021): Machine Learning Approaches for AFM/MFM Image Reconstruction. *Sensors*, 21(11).
12. Shibuya, H., Ito, S., Utsugi, H. (2017): Forensic Analysis of Damaged HDDs: A Study of Magnetic Micro-Imaging. *Digital Investigation*, 20.
13. Johansson, D., Eriksson, M. (2005): Evaluating the Feasibility of MFM for Data Forensics. *Technical Report, Chalmers University of Technology*.
14. Chen, P.J., Liao, C.H., Pan, Y.T. (2020): Novel MFM Probes with Enhanced Resolution for High-Density HDD Analysis. *Journal of Magnetic Materials*, 502.
15. Bhattacharya, B., Mahajan, S., Patel, N. (2012): Limitations of Overwriting: Investigating Magnetic Remanence using MFM. *International Journal of Digital Evidence*, 11(2).

J. Hoffmeister, Stand: 11.01.2025

Schlussbemerkung

Autor: Johannes Hoffmeister, Reverse Engineer bei DATA REVERSE® Datenrettung (LinkedIn-Profil)

Die vorliegende Abhandlung zeigt, dass die mikroskopische Datenrettung mit Magnetkraftmikroskopie zwar tiefe Einblicke in das physische Speichermedium einer Festplatte ermöglicht, aber nur unter ganz bestimmten Voraussetzungen zu nennenswerten Rekonstruktionserfolgen führt. Bei stark beschädigten Datenträgern – insbesondere nach langer Deponie-Lagerung – dürfte die praktische Rettung größerer Datenbestände auch in absehbarer Zukunft eine Ausnahme bleiben. MFM bleibt dennoch ein wichtiges Werkzeug in der Forschung und Forensik, um die Grenzen der Datenspeicherung und -vernichtung besser zu verstehen sowie seltene Spezialfälle zu bearbeiten.

© 2025, Johannes Hoffmeister