

# Der große Lauschangriff auf Ladendiebe

Waren lassen sich durch weichmagnetische Sensorstreifen oder elektrische Schwingkreise vor Diebstahl sichern

Giselher Herzer

Ladendiebstähle führen weltweit zu herben Verlusten: Allein in Deutschland gehen dem Einzelhandel pro Jahr fast 5 Milliarden Mark verloren. Neben Detektiven und Kameraüberwachung gelten vor allem elektronische Warensicherungssysteme als wirksame Waffe gegen Diebe. Bei diesen Systemen werden Sicherungsetiketten – elektrische Schwingkreise oder weichmagnetische Sensorstreifen – an der Ware angebracht, die in Schleusen am Ladenausgang von elektromagnetischen Feldern angeregt werden. Bei unbezahlter Ware, das heißt aktiven Etiketten, wird ein Signal detektiert und Alarm ausgelöst. Allein der Weltmarktführer Sensor-matic hat heute weltweit schon etwa 450 000 Warensicherungssysteme installiert, und täglich werden mehrere Millionen Warensicherungsetiketten gefertigt.

Der Hauptverband des Deutschen Einzelhandels schätzt, dass in Deutschland Jahr für Jahr mindestens 6,5 Millionen Ladendiebstähle begangen werden und nur etwa jeder zehnte davon entdeckt wird. Gestohlen werden meist hochwertige Artikel wie Kosmetika, Kleidung und Goldschmuck – Ladendiebstahl ist zum Wohlstandsdelikt geworden. Um besser gegen Diebe gewappnet zu sein, investiert der deutsche Handel jährlich etwa 1,5 Milliarden Mark in Sicherheitssysteme. Mit diesen Systemen, so schätzen Experten, lassen sich die Verluste um 70 % reduzieren. Gegenwärtig befinden sich verschiedene elektronische Warensicherungen auf dem Markt. Sie beruhen alle auf dem gleichen Grundprinzip: An der Ware sind Sicherungsetiketten befestigt, die in Schleusen am Ladenausgang von elektromagnetischen Feldern angeregt werden (Abb. 1). Ist die Ware unbezahlt, das heißt, sind die Etiketten noch aktiv, antworten diese mit einem Signal. Antennen – meist im Boden oder in den Schleusen selbst versteckt – registrieren dieses Signal und lösen einen schrillen Alarmton aus. Bei bezahlter Ware bleiben die Etiketten stumm, denn sie wurden an der Kasse entweder entfernt oder deaktiviert.

Elektronische Warensicherungsetiketten müssen vier Forderungen erfüllen: Sie müssen möglichst klein und billig sein, zuverlässig Alarm auslösen, sicher deaktivierbar sein und sollten Fehlalarme vermeiden.

Bei den heutigen Etiketten handelt es sich um Wegwerfartikel, welche auch zur Sicherung von Billigarti-



**Abb. 1:** Zur Diebstahlsicherung werden Sicherungsetiketten an der Ware befestigt, die sich in Schleusen am Ladenausgang detektieren lassen. Obwohl die Etiketten ganz verschieden aussehen können, gibt es vom Prinzip her nur drei verschiedene Warensicherungssysteme: das Radiofrequenz-, das elektromagnetische und das akustomagnetische System.

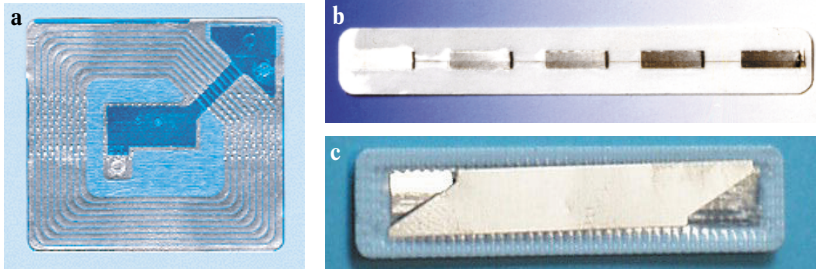
keln verwendet werden. Zudem herrscht der mittlerweile stark zunehmende Trend, die Sicherungsetiketten maschinell und unauffällig bereits in die Verpackung zu integrieren, die so genannte Quellsicherung, womit sich Manipulationsmöglichkeiten einschränken und die Kosten für die personalintensive Anbringung der Elemente reduzieren lassen. Hieraus ergibt sich praktisch von selbst die erste Forderung nach kleinen und billigen, nur wenige Pfennige kostenden Etiketten.

Die weiteren Forderungen resultieren aus der technischen Aufgabenstellung, die von dem Sicherungsetikett leicht und eindeutig detektierbare, ein- und ausschaltbare und vor allem unverwechselbare Eigenschaften verlangt (*uniqueness*). Hier steht, neben dem beinahe selbstverständlichen Anspruch auf eine sichere Alarmauslösung, besonders die Vermeidung von Fehlalarmen im Vordergrund. Letzteres ist im US-Markt von zentraler Bedeutung. Denn dort reagieren fälschlicherweise verdächtige Kunden weitaus vehementer als in Europa: Sie klagen auf Schmerzensgeld und erhalten in manchen Fällen immense Summen.

Gegenwärtig befinden sich im Wesentlichen drei verschiedene Warensicherungssysteme auf dem Markt:

Dr. Giselher Herzer,  
Vacuumschmelze  
GmbH & Co. KG,  
Entwicklung Rascher-  
erstrang, 63450  
Hanau

die historisch gesehen älteste Technologie der Radiofrequenzsysteme, die elektro-magnetischen (oder harmonischen) Systeme und als jüngste Technologie die akustomagnetischen Systeme. Der Beitrag der Firma Vacuumschmelze zur Warensicherung konzentriert sich auf die beiden letztgenannten magnetischen Systeme; sie entwickelt und fertigt Metallbänder mit hochgezüchteten Eigenschaften für Sensoren und Deaktivierungstreifen, die an System- bzw. Etikettenhersteller geliefert werden.



**Abb. 2:**  
Die Sicherungsetiketten aller drei Systeme im Überblick:  
► a) Die Etiketten von Radiofrequenzsystemen besitzen einen elektrischen Schwingkreis – meist als Teil einer gedruckten Schaltung.  
► b) Die Etiketten elektromagnetischer Systeme bestehen aus einem 40 bis 80 mm langen magnetostruktionsfreien, amorphen Sensorstreifen (schmales Band) und mehreren kurzen, magnetisch halbhartem Streifen als Ein-/Ausschalter.  
► c) In den Etiketten akustomagnetischer Systeme befinden sich zwei etwa 40 mm lange Streifen: ein magnetostruktiver, amorpher Streifen als Sensor (im Bild teilweise verdeckt) und ein magnetisch halbharter Streifen als Ein-/Ausschalter.

### Radiofrequenzsysteme

Bei den Radiofrequenzsystemen besteht das Sicherungsetikett im Wesentlichen aus einem elektrischen Resonanzkreis, d. h. aus einer Spule mit wenigen Windungen und einem Kondensator [1]. Für diesen Zweck wird meist eine flache, gedruckte, typischerweise einige Zentimeter große Schaltung als Resonanzkreis verwendet (Abb. 2a). Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 3 dargestellt. Zur Detektion wird ein Radiofrequenzsignal im MHz-Bereich eingestrahlt, dessen Frequenz um die Resonanzfrequenz des Schwingkreises periodisch moduliert wird. Liegt die eingestrahlte Frequenz außerhalb der Resonanzfrequenz des Schwingkreises, so weist dieser eine hohe Impedanz auf und absorbiert nur sehr wenig Energie. Im Resonanzfall jedoch absor-

biert der Schwingkreis aus dem eingestrahlten Signal relativ viel Energie. Es kommt so auf der Empfängerseite zu periodischen, relativ plötzlich auftretenden Empfangsverlusten, welche charakteristisch für das Sicherungsetikett sind. Mithilfe dieser periodischen Absorptionsverluste lässt sich das Etikett auch von größeren metallischen Gegenständen unterscheiden, die unter Umständen deutlich mehr Energie absorbieren können. Deaktiviert werden kann das Etikett auf zwei Arten: Entweder entfernt man es von der Ware, an der es mit einem Magnetschloss befestigt ist, oder man zerstört den Schwingkreis durch einen Strom- oder Energiepuls.

Ein Vorteil der Radiotechnik ist der relativ große mögliche Abstand zwischen Etikett und Sende- bzw. Empfangsantenne; er kann 5 m und mehr betragen. Ein Nachteil jedoch ist ihre Störanfälligkeit: Zum einen können die erregenden Mikrowellen sehr leicht abgeschirmt werden und so eine Detektion des Sicherungsetikettes verhindern. Zum anderen sind Fehlalarme keine Seltenheit, da das System auch auf andere elektronische Schwingkreise, wie sie zum Beispiel in Hörgeräten oder Mobiltelefonen zu finden sind, ansprechen kann. Um Fehlalarme zu reduzieren, enthalten weiterentwickelte Sicherungsetiketten z. B. mehrere Schwingkreise [2] oder nichtlineare Bauelemente wie Dioden [3], um das Etikett mit zusätzlicher Signal-Identität zu versehen.

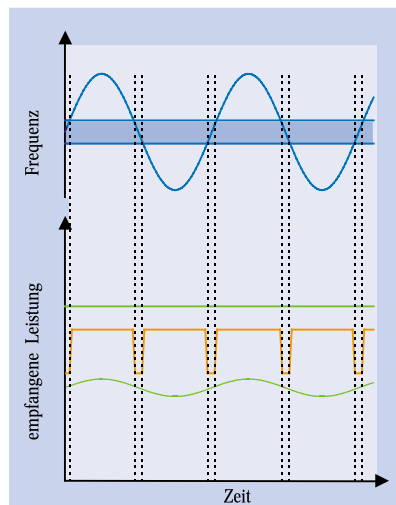
### Magnetische Systeme

Aufgrund ihrer Störanfälligkeit und manchmal auch aufgrund ihrer relativ großen Abmessungen wurden und werden Radiofrequenzsysteme immer mehr von elektromagnetischen und besonders stark auch von akustomagnetischen Systemen in den Hintergrund gedrängt. Das aktive, alarmauslösende Herzstück dieser beiden Systeme ist kein elektrischer Schwingkreis, sondern ein kurzer weichmagnetischer Streifen, dessen charakteristisches Ummagnetisierungsverhalten zur Detektion herangezogen wird. Zusätzlich liegen dem Sensor meist noch ein oder mehrere hartmagnetische Metallstreifen bei, die nach Entmagnetisieren oder Aufmagnetisieren, je nach Etikettentyp, den Sensorstreifen deaktivieren oder aktivieren (Abb. 2b, c).

Für den weichmagnetischen Sensor werden mittlerweile fast nur noch amorphe Metallstreifen eingesetzt (siehe Infokasten „Amorphe Metalle“). Ein Hauptvorteil dieser neuen Werkstoffgeneration ist ihre hohe mechanische Streckgrenze, die eine Zerstörung der eingestellten magnetischen Eigenschaften durch plastische Deformation praktisch unmöglich macht. Frühere Etiketten aus konventionellen weichmagnetischen Metallen wie Permalloy ließen sich zum Beispiel durch leichtes Hin- und Herknicken sehr einfach unbrauchbar machen. Ferner weisen die dünnen amorphen Bänder sehr geringe Wirbelstromverluste auf, was sich positiv in der Stärke des Antwortsignals äußert. Funktion und Optimierung des Sensorstreifens unterscheidet sich für beide Systeme stark, was im Folgenden noch ausführlich diskutiert wird.

Die Anforderungen an den hartmagnetischen (genauer magnetisch halbhartem) Streifen sind für beide Systeme in etwa dieselben: Er muss eine mittlere Koerzitivfeldstärke  $H_c$  aufweisen, die nicht zu klein, aber auch nicht zu groß ist. Die untere Grenze für  $H_c$  resultiert aus der Forderung, dass der Streifen nicht durch sein eigenes Entmagnetisierungsfeld und/oder die Mag-

**Abb. 3:**  
Radiofrequenzsysteme arbeiten mit periodisch frequenzmodulierter Radiostrahlung (blaue Kurve). Solange die Schleuse leer ist, wird in der Empfangsantenne eine konstante, frequenzunabhängige Leistung detektiert (obere grüne Kurve). Befindet sich jedoch ein Sicherungsetikett in der Schleuse, ist der Schwingkreis des Etiketts im blau markierten Frequenzbereich mit der Senderfrequenz in Resonanz und absorbiert – verglichen mit der hohen Impedanz bei Nichtresonanz – relativ viel Energie. Dies lässt sich als periodisch und relativ plötzlich auftretender Verlust detektieren (orange Kurve). Metallische Gegenstände weisen diese Charakteristik nicht auf und stören damit nicht bei der Detektion (untere grüne Kurve).



netfelder in der Überwachungsschleuse entmagnetisiert wird. (Diese können in der Nähe der Sendespulen durchaus einige 100 A/m betragen.) Andererseits sollten die zum Auf- oder Entmagnetisieren (d. h. zum Deaktivieren oder Aktivieren) benötigten Felder aus praktischen Gründen auch nicht zu groß sein. Typisch sind letztlich Koerzitivfeldstärken von 1600–8000 A/m. Solch ein magnetisch halbhartes Material besteht üblicherweise aus einer speziellen kristallinen Fe-Basis-Legierung mit Zusätzen an Ni, Co und/oder Cr und gegebenenfalls aushärtenden Elementen wie Ti und Al.

### Elektromagnetische Systeme

Elektromagnetische Sicherungssysteme sind gegenwärtig vor allem noch in Europa verbreitet. In den USA verwendet man sie nur noch in Bibliotheken. Dieses Sicherungssystem heißt auch harmonisches System, weil die Etiketten auf die elektromagnetischen Felder der Schleusen mit harmonischen Oberwellen antworten (Abb. 4a). Genauer gesagt, der Magnetstreifen wird mit einem sinusförmigen magnetischen Wechselfeld ständig ummagnetisiert und dabei jeweils voll in die ferromagnetische Sättigung gefahren. Während die Permeabilität im zentralen Teil der Hystereseschleife in der Größenordnung tausend liegt, fällt sie nach Erreichen der Sättigung rasch auf eins ab. Durch diesen ständigen Permeabilitätswechsel ist die resultierende Magnetisierungsänderung bzw. die dadurch in den Empfängerspulen induzierte Spannung kein reiner Sinus mehr: Sie enthält einen hohen Oberwellenanteil, der letztlich zur Detektion des Sensors analysiert wird [4].

Es ist schon intuitiv einleuchtend, dass der Oberwellenanteil um so höher ist – das Etikett also um so leichter detektierbar ist – je mehr das erregende Feld den Streifen in die Sättigung fährt bzw. je steiler der zentrale Teil der Magnetisierungsschleife ist. Für die Stärke des erregenden Feldes sind jedoch durch die Strahlenschutzrichtlinien strenge Grenzwerte vorgegeben, d. h. die Amplitude des erregenden Wechselfeldes liegt in der Regel nur in der Größenordnung der Erd-

feldstärke (einige 10 A/m). Das Material muss deshalb sehr leicht, also mit relativ kleinen Feldstärken, ummagnetisierbar sein. Diese leichte Ummagnetisierbarkeit ist gleichzeitig auch das geforderte „unverwechselbare“ Kennzeichen des Sensorstreifens, um ihn von anderen magnetischen Materialien (Einkaufswagen, Uhren, Schlüssel, Brillen usw.) sicher zu unterscheiden und die Auslösung von Fehlalarmen zu vermeiden. Man erreicht dies durch amorphe Legierungen auf Co-Basis, die bereits ohne spezielle Wärmebehandlung eine extrem kleine Koerzitivfeldstärke ( $H_c \leq 1$  A/m) und eine rechteckige Hystereseschleife mit hohem Remanenzverhältnis ( $> 0,8$ ) besitzen und so extrem leicht ummagnetisierbar sind. In Abbildung 4b ist eine solche „ungescherte“ Hystereseschleife dargestellt (blaue Kurve). Sie entspricht der intrinsischen Magnetisierungskurve des Materials, wie sie z. B. in einem geschlossenen magnetischen Kreis oder an einem sehr langen Streifen gemessen wird.

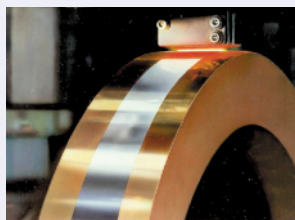
Begrenzend für die geforderte leichte Ummagnetisierung ist letztlich nur der Entmagnetisierungsfaktor. Dieser ist dann besonders klein, wenn der Querschnitt des Sensorstreifens besonders klein ist. Deshalb müssen hier relativ schmale (typ. 1–2 mm) und dünne (typ. 20–30  $\mu\text{m}$ ) Bänder eingesetzt werden. Der geringe Querschnitt reduziert jedoch auch das emittierte Signal und begrenzt dadurch die typische Schleusenbreite auf ca. 1 m. Die Notwendigkeit eines möglichst kleinen Entmagnetisierungsfaktors erfordert in der Regel auch relativ lange Sicherungstreifen (bis ca. 80 mm). Spezielle Maßnahmen lassen es jedoch zu, die Streifen auf eine Länge von etwa 40 mm zu begrenzen. Zum Beispiel kann das entmagnetisierende Feld durch spezielle Zusammensetzungen mit besonders kleiner Sättigungsmagnetisierung weiter minimiert werden [5]. Eine andere Möglichkeit ist das Einbringen von großen Barkhausen-Sprüngen, die im „gescherten“ Zustand, d. h. auch unter Einfluss des entmagnetisierenden Feldes, bestehen bleiben und so die Begrenzung der Permeabilität durch den Entmagnetisierungsfaktor aufheben. Hierzu wird die Keimbildungsfeldstärke für die Um-

### Amorphe Metalle

Amorphe Metalle sind eine knapp 30 Jahre junge Werkstoffgruppe. In herkömmlichen, kristallinen Metallen sind die Atome streng regelmäßig angeordnet. Die Atome amorpher Werkstoffe sind dagegen völlig ungeordnet, ähnlich wie in einer Flüssigkeit oder Schmelze. Da dies auch für Glas zutrifft, bezeichnet man amorphe Metalle auch als metallische Gläser.

Bei der Herstellung amorpher Metalle wird die ca. 1200 °C heiße Schmelze auf eine mit 100 km/h rotierende Kühlwalze gedrückt. Beim Auftreffen auf die Walze kühlt die Schmelze in einer Tausendstelsekunde um mehr als ca. 1000 K ab, was einer Abkühlrate von einer Million Kelvin pro Sekunde entspricht. Das rasch erstarrte

amorphe Metallband wird von der rotierenden Walze mitgenommen, während des Flugs aufgefangen und auf einer Haspel aufgerollt. Auf diese Weise entsteht ein dünnes amorphes Metallband mit einer Dicke von 0,02 bis 0,025 mm.



Amorphe Metalle für magnetische Anwendungen bestehen typischerweise zu 75 bis 85 % aus den Übergangsmetallen Eisen, Nickel und/oder Kobalt und zu 15 bis 25 % aus den Glasbild-

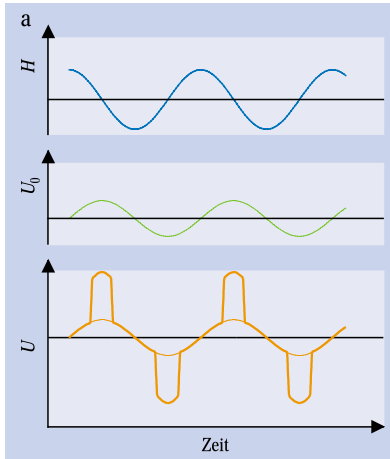
nern Silizium und Bor. Die ungeordnete Atomstruktur verleiht ihnen dabei eine einzigartige Kombination aus sehr guten weichmagnetischen Eigenschaften und mechanischer Unempfindlichkeit (hohe mechanischer Härte und Streckgrenze). Die Struktur bedingt auch einen im Vergleich zu herkömmlichen weichmagnetischen Werkstoffen ca. 2- bis 3-mal so hohen, weitgehend temperaturunabhängigen spezifischen elektrischen Widerstand. Gepaart mit der kleinen Banddicke, welche bei kristallinen Werkstoffen nur durch mehrfache, kostenintensive Walzprozesse eingestellt werden kann, zeichnen sich amorphe Metalle ferner durch sehr kleine Wirbelstromverluste aus.

Amorphe Metalle besitzen

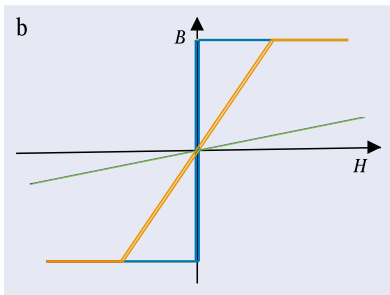
bereits direkt nach dem Abkühlen gute bis sehr gute weichmagnetische Eigenschaften. Dies gilt insbesondere für die magnetostruktionsfreien Legierungsvarianten auf Co-Basis, wie sie z. B. in vielen harmonischen Warensicherungsetiketten verwendet werden.

Kommt es aber sowohl auf ein spezifisches als auch auf ein sehr gut reproduzierbares Magnetisierungsverhalten an, z. B. für akustomagnetische Warensicherungsetiketten, so werden die Bänder nach ihrer Herstellung in der Regel noch einer Wärmebehandlung unterzogen, bei der die benötigten magnetischen Eigenschaften gezielt eingestellt werden.

magnetisierung etwas größer als das entmagnetisierende Feld eingestellt. Realisiert werden kann dies durch spezielle Wärmebehandlungsverfahren magnetostruktionsfreier Legierungen [4, 6, 7] oder – in amorphen, magnetostruktiven Fe-Basis-Drähten – durch die herstellbedingten inneren mechanischen Spannungen [8]. Abbildung 4b zeigt die „gescherte“ Magnetisierungskurve eines aktiven Sensorstreifens (orange Kurve). Die Scherung entsteht über die vom Streifenende ausgehenden Streufelder, die innerhalb des Streifens dem angelegten, äußeren Magnetfeld  $H$  entgegengerichtet sind. Die Stärke der Scherung ist über den Entmagnetisierungsfaktor bestimmt, der von der Probenform abhängt und in etwa proportional zum Bandquerschnitt und umgekehrt proportional zum Quadrat der Streifenlänge ist.



**Abb. 4:**  
 ▶ a) Elektromagnetische Systeme arbeiten mit sinusförmigen magnetischen Wechselfeldern  $H$  (blaue Kurve), die den Magnetstreifen im Sicherungsetikett periodisch ummagnetisieren. Durch die dabei erzeugten ständigen Permeabilitätswechsel des Sensorstreifens im Verhältnis 1 zu 1000 ist die resultierende Magnetisierungsänderung bzw. die in den Empfängerspulen induzierte Spannung  $U$  (orange Kurve) keine reine Sinuskurve mehr; ihr hoher Oberwellenanteil wird zur Detektion des Sensors analysiert. Im Gegensatz dazu ist die Empfängerspannung ohne bzw. mit deaktiviertem Etikett  $U_0$  ein reiner Sinus (grüne Kurve).  
 ▶ b) Für verschiedene Zustände des Sensorstreifens ist die Magnetisierungsschleife unterschiedlich stark geschert: Die blaue Kurve entspricht der intrinsischen Magnetisierungskurve eines sehr langen Sensorstreifens, die orange Kurve verkörpert die Magnetisierungsschleife eines aktiven Streifens, und die grüne Kurve ist charakteristisch für einen deaktivierten Sensorstreifen (siehe Text).



Der effektive Entmagnetisierungsfaktor des Sensorstreifens bildet auch den Angriffspunkt zur Deaktivierung des Sicherungsetiketts. Dies geschieht entweder dadurch, dass der beigelegte halbharte Streifen auf seiner Länge alternierend aufmagnetisiert wird. Oder man fügt dem Sensorstreifen in gewissen Abständen eine Reihe kurzer halbharter Streifen bei, die zur Deaktivierung aufmagnetisiert werden. In beiden Fällen wird der magnetische Pfad innerhalb der Sensorkomponente unterbrochen, d. h. der Sensorstreifen wird lokal in die ferromagnetische Sättigung getrieben und so effektiv in mehrere kurze Stücke unterbrochen mit jeweils sehr hohem Entmagnetisierungsfaktor. Dieser ist entscheidend für eine gute Deaktivierung. Die grüne Kurve in Abbildung 4b entspricht der stark „gescherten“ Magnetisierungskurve eines deaktivierten Etikettes. Von den in der Schleuse herrschenden Wechselfeldern kann diese Magnetisierungskurve nicht mehr in die Sättigung getrieben werden, d. h. es entstehen keine Oberwellenanteile mehr.

**Akustomagnetische Systeme**

Akustomagnetischen Systeme gibt es seit etwa zehn Jahren. In den USA haben sie die beiden anderen Systeme schon weitgehend verdrängt. Auch in Europa halten sie zunehmend Einzug. Das System zeichnet sich durch großflächige Überwachungsmöglichkeiten mit bis zu 5 m Schleusenbreite aus, durch kleine und billige Sicherungsetiketten, hohe Detektionsraten und praktisch keine Fehlalarme.

Das Sicherungsetikett besteht aus einer kleinen Plastikbox – etwa 40 mm lang, je nach Ausführung ca. 8–14 mm breit und nur knapp 1 mm hoch. Aktiver Bestandteil ist ein dünner, weichmagnetischer, amorpher Metallstreifen, der in der Box frei beweglich gelagert ist. In den Boden der Plastikbox ist zudem ein dünner magnetisch halbharter Metallstreifen integriert, der zur Aktivierung und Deaktivierung des Sensors dient (Abb. 2c). Das Funktionsprinzip dieses Systems beruht auf den Effekten der Magnetostruktion und der mechanischen Eigenresonanz (Abb. 5a), die als brummender Trafo bzw. von einer Stimmgabel wohl vertraut sind.

Analog zu einem Trafo wird das amorphe Metallplättchen durch ein magnetisches Wechselfeld zu mechanischen Schwingungen angeregt. Genauer gesagt regen kurze magnetische Wechselfeldimpulse den amorphen Sensorstreifen zu mechanischen Eigenschwingungen im Ultraschallbereich an (Abb. 5b). Dies entspricht dem Anstoßen einer Stimmgabel; analog zu dieser bleibt die Schwingung einige Zeit nach dem Anstoßen bestehen. Da es sich hier aber um einen magnetischen, magnetostruktiven Werkstoff handelt, bewirkt die nachklingende mechanische Schwingung ihrerseits wieder eine Magnetisierungsänderung mit der selben Frequenz, d. h. der Streifen wirkt als kleiner Sender elektromagnetischer Strahlung und lässt sich in den Empfängerantennen des Überwachungssystems detektieren. Wichtig ist, dass das erregende magnetische Wechselfeld während des Echo-Impulses ausgeschaltet ist. Im Gegensatz zum harmonischen Systemen fällt das Hintergrundsignal in den Empfängerantennen weg und das Etikett ist besser und zuverlässiger zu detektieren: Das erlaubt unter anderem bis zu 5 m breite Schleusen. Beim harmonischen System dagegen dürfen die Schleusen nicht breiter als etwa 1 m sein.

Unverwechselbares Kennzeichen des schwingenden, weichmagnetischen Sensorstreifens ist seine Eigenfrequenz. Sie wird durch die Länge und den Magnetisierungszustand des Sensors bestimmt. Letzteres heißt aber auch, dass diese charakteristische Frequenz durch äußere Magnetfelder beeinflusst werden kann (siehe Infokasten „Magnetoelastische Grundlagen“). Genau dieser Umstand wird zur Aktivierung und Deaktivierung des Sicherungsetikettes ausgenutzt. Hierzu dient der beigelegte hartmagnetische Metallstreifen [9]: Ist der hartmagnetische Streifen aufmagnetisiert, so bewirkt das von ihm ausgehende Magnetfeld, dass der Sensorstreifen mit maximaler Amplitude und genau mit der von der Empfängerelektronik überwachten Frequenz schwingt. Das heißt, das Sicherungsetikett ist aktiviert und löst beim Passieren der Sender- und Empfängerspulen Alarm aus (Abb. 5c). Entmagnetisiert man den hartmagnetischen Streifen, lässt man also das von ihm ausgehende Magnetfeld verschwinden und ändert dadurch die Resonanzfrequenz des Sensorstreifens, deaktiviert man den Sensor: Das Sicherungselement löst keinen Alarm aus (Abb. 5c).

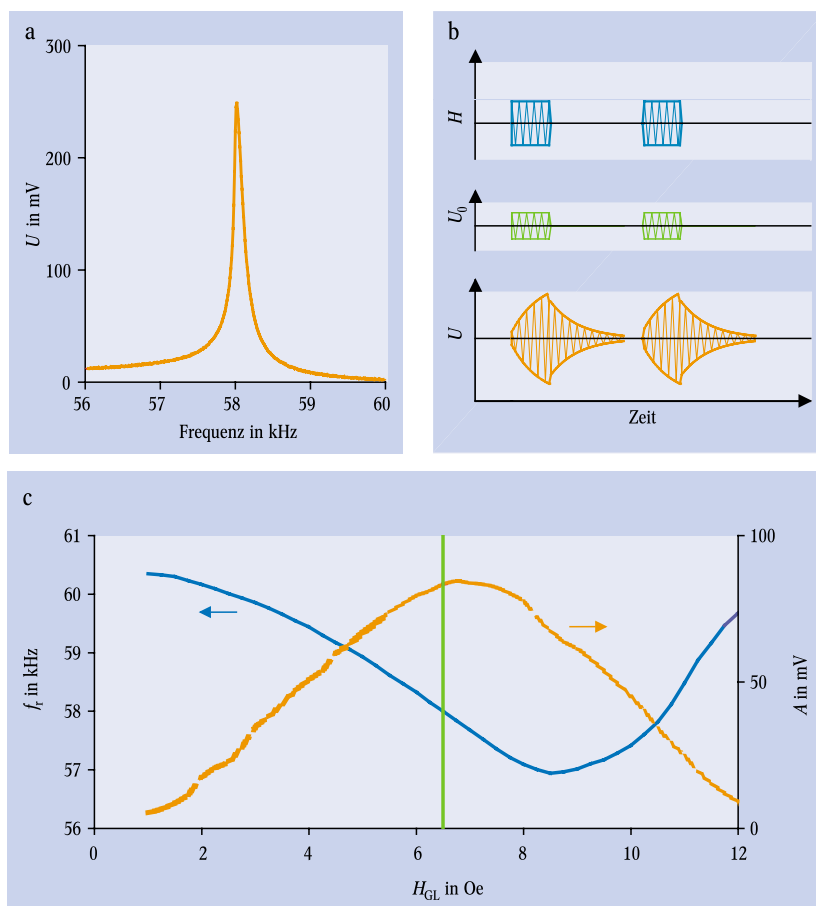
Im deaktivierten Zustand muss das charakteristische magnetische Verhalten des akustomagnetischen Sensorstreifens derart ausgelegt sein, dass es zu keiner Alarmauslösung in den zuvor beschriebenen harmonischen Systemen kommt. Historisch gesehen war das der Schwachpunkt der ersten akustomagnetischen Etiketten, für die eine amorphe, magnetostruktive Fe-Ni-Basis-Legierung ( $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$ ) eingesetzt wurde, die nicht weiter speziell behandelt war. Aufgrund der nichtlinearen Charakteristik der Hystereseschleife dieser ersten Streifen kam es zu unerwünschter Alarmauslösung in harmonischen Systemen. Dieses Verhalten lässt sich jedoch unterdrücken [10]: Durch eine Wärmebehandlung in einem Magnetfeld wird eine magnetisch leichte Richtung senkrecht zur Streifenrichtung induziert. Das hat eine Linearisierung der Hystereseschleife bis zur ferromagnetischen Sättigung zur Folge. Wichtig dabei ist, dass die Sättigung erst in relativ hohen Magnetfeldern erreicht wird (typ. 800 A/m oder mehr). Zum einen wird dann kein Alarm in den schwachen Wechselfeldern harmonischer Systeme ausgelöst, und zum anderen schwingt auch der Resonator möglichst lange nach [11, 12]. Nur in speziellen Legierungssystemen kann sich während der Wärmebehandlung ein relativ hohes Anisotropiefeld aufbauen. Solche Legierungen lassen sich vor allem durch Co-Zusätze herstellen; aufgrund der relativ hohen Rohstoffkosten für Kobalt sind jedoch möglichst geringe Co-Gehalte wünschenswert. Besonders eignen sich ternäre Systeme in den Übergangsmetallen Fe, Co und Ni – ein typischer Legierungsbereich ist z. B.  $\text{Ni}_{\text{Rest}}\text{Fe}_{20-30}\text{Co}_{10-20}\text{Si}_{1-3}\text{B}_{15-18}$  (at %). Bei derartig linearisierten Schleifen läuft der Magnetisierungsprozess vorwiegend über Drehprozesse der Magnetisierung ab, womit gleichzeitig die beste magnetostruktive Kopplung erreicht wird [13]. Damit ergaben sich höhere Resonanzamplituden, die es zuließen, die ursprüngliche Streifenbreite zu halbieren.

Wichtig für eine sichere Funktionsweise des Etikettes ist, dass die Signalamplitude im aktivierten Zustand maximal ist, möglichst einige Millisekunden nachschwingt (weder zu kurz noch zu lang) und die Eigenfrequenz bei vorgegebener Länge möglichst genau getroffen wird. Letzteres bedeutet unter anderem die bei ferromagnetischen Materialien vorhandene Magnetfeldabhängigkeit des Elastizitätsmoduls möglichst gering zu halten, um die Resonanzfrequenz unempfindlich gegenüber kleinen Änderungen des äußeren Magnetfeldes zu machen, die z. B. durch Materialschwankungen des hartmagnetischen Streifens oder durch verschiedene Orientierungen im Magnetfeld der Erde entstehen können. Auch hierfür ist ein möglichst hohes Anisotropiefeld und eine nicht zu hohe Magnetostruktion wünschenswert. Andererseits aber muss sich gleichzeitig die Eigenfrequenz (also letztlich der Elastizitätsmodul) mit dem Magnetfeld genügend stark ändern, um das Sicherungsetikett durch Entmagnetisieren des hartmagnetischen Streifens zuverlässig deaktivieren zu können. Dies erfordert also ein nicht zu hohes Anisotropiefeld und genügend hohe Magnetostruktion. Solche teilweise gegenläufigen Anforderungen erfordern eine spezielle, sehr präzise Abstimmung von Streifengeometrie, chemischer Zusammensetzung und Wärmebehandlung, um einen maßgeschneiderten und wirtschaftlich günstigen Resonatorstreifen zu erhalten. Durch ein neu entwickeltes Wärmebehandlungsverfahren, das eine sehr feine Domänenstruktur mit einer

Domänenweite von ca. 5–10  $\mu\text{m}$  liefert, konnte ferner die Resonatoramplitude deutlich erhöht und so die Funktionsweise des Sensors weiter verbessert werden [14].

**Ausblick**

Bei den momentanen Sicherungsetiketten handelt es sich um 1-Bit-Systeme. Das heißt, es kann lediglich festgestellt werden, ob sich ein Etikett in der Überwachungszone befindet oder nicht – zwischen einem und mehreren Sicherungsetiketten wird nicht unterschieden. Die Zukunft wird Mehr-Bit-Systeme mit sich bringen, die neben der reinen Warensicherung auch eine Identifikation und ein Zählen der Ware ermöglichen. Damit könnte man eines Tages mit vollbepacktem Einkaufswagen einfach an der Kasse vorbeifahren und alle

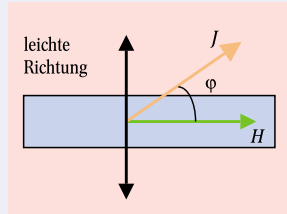


**Abb. 5:**  
 ▶ a) Der magnetostruktionsfreie, amorphe Sensorstreifen von akustomagnetischen Systemen besitzt die typische Resonanzkennlinie einer erzwungenen Schwingung und eine charakteristische Resonanzfrequenz  $f_r$  bei 58 kHz. Sie ist gegeben durch  $f_r = (2L)^{-1}(E/Q)^{1/2}$ , wobei  $L$  die Länge,  $E$  der Elastizitätsmodul und  $Q$  die Dichte des Sensorstreifens ist.  
 ▶ b) Das äußere Magnetfeld  $H$  der Schleuse (blaue Kurve) regt den Sensorstreifen durch kurze magnetische Wechselfeldimpulse zu mechanischen Eigenschwingungen an. Der Sensor wird dadurch selbst zum Sender elektromagnetischer Strahlung, die sich als Echo-Impuls  $U$  (orange Kurve) in den Empfängerspulen detektieren lässt. Befindet sich kein oder nur ein deaktiviertes Etikett im erregenden Feld  $H$ , so wird auch kein Echo-Impuls gemessen (grüne Kurve).  
 ▶ c) Resonanzfrequenz  $f_r$  und Signalamplitude  $A$  als Funktion des vormagnetisierenden Gleichfeldes  $H_{GL}$ , das durch den im Etikett liegenden Dauermagnetstreifen erzeugt wird – 1 ms nach Anregung durch  $H$ . Für den aktiven Zustand stellt  $H_{GL}$  die Resonanzfrequenz (blaue Kurve) auf den fest vorgegebenen Wert  $f_r = 58$  kHz ein, bei dem die Amplitude praktisch maximal ist (Schnittpunkte mit grüner Linie). Hierzu müssen die Eigenschaften von Resonator- bzw. Dauermagnetstreifen exakt aufeinander abgestimmt sein. Zur Deaktivierung des Etikettes wird der Dauermagnetstreifen entmagnetisiert, d. h.  $H_{GL}$  wird abgeschaltet: Dadurch ändert sich die Resonanzfrequenz, und die Signalamplitude (orange Kurve) fällt stark ab (1 Oe  $\approx$  80 A/m).  
 Näheres siehe Text.

## Grundlagen der Magnetoelastik

Wird ein ferromagnetischer Werkstoff aufmagnetisiert, so ist dies in der Regel mit einer Längenänderung verknüpft. Dieses Phänomen wird als Magnetostraktion bezeichnet. Ihr Umkehrerffekt äußert sich darin, dass bei einem magnetostruktiven Werkstoff eine durch eine mechanische Spannung  $\sigma$  erzwungene Dehnung  $\varepsilon$  in einer Änderung der Magnetisierung  $J$  resultiert. Die Sättigungsmagnetostraktion  $\lambda_s$  entspricht der relativen Längenänderung, wenn das Material aus dem ideal entmagnetisierten Zustand in die ferromagnetische Sättigung gebracht wird und ist ein legierungsspezifischer Materialparameter zur Kennzeichnung des magnetostruktiven Verhaltens.

Das Phänomen der Magnetostraktion resultiert aus der Dehnungsabhängigkeit der magnetischen Anisotropieenergie und tritt nur bei Magnetisierungsänderungen auf, die mit einer Rotation der lokalen Magnetisierung verknüpft sind, während reine Domänenwandverschiebungen im Idealfall keine magnetostruktiven Längenänderungen zur Folge haben. Magnetostruktive Effekte sind deshalb besonders dann effektiv, wenn das magnetisierende Feld senkrecht zur magnetischen leichten Richtung angelegt wird (Abb. i).



**Abb. i:** Der Magnetisierungswinkel  $\varphi$  ist definiert als Winkel zwischen dem (lokalen) Magnetisierungsvektor  $J$  und dem magnetisierenden Feld  $H$ .

Die spontane magnetostruktive Dehnung in Magnetisierungsrichtung ist für ein isotropes Material gegeben durch,

$$\varepsilon_{MS} = \frac{3}{2} \lambda_s \cdot \cos^2 \varphi(H, \sigma),$$

wobei  $\varphi$  den Winkel zwischen dem (lokalen) Magnetisierungsvektor und dem angelegtem Magnetfeld bezeichnet. Der Magnetisierungswinkel  $\varphi$  hängt sowohl

vom angelegten Magnetfeld als auch, wie oben erwähnt, von mechanischen Spannungen  $\sigma$  ab. Im Falle einer magnetischen leichten Richtung senkrecht zur Streifenrichtung (Abb. i) ist  $\varphi$  über  $J_H = J_s \cos \varphi$  direkt mit der gemessenen Magnetisierung  $J_H$  verknüpft.

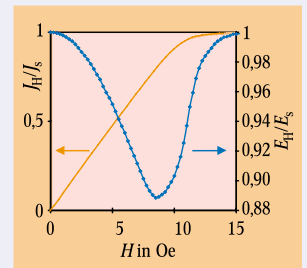
Die spontane magnetostruktive Dehnung  $\varepsilon_{MS}$  ist nicht spannungswirksam und muss deshalb (analog zu thermischen oder plastischen Dehnungen) in der Spannungs-Dehnungsbeziehung von der relativen Gesamtdehnung  $\varepsilon$  abgezogen werden, d. h. das Hookesche Gesetz muss lauten,

$$\sigma = E_s \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{MS}(H, \sigma)),$$

wobei  $E_s$  (in unserem Fall ca. 160 GPa) der reine Elastizitätsmodul des Materials ist. So resultiert ein Elastizitätsmodul  $E_H$ , der vom Magnetisierungszustand abhängig ist. Er ist durch folgende Gleichung gegeben:

$$\frac{1}{E_H} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \Big|_H = \frac{1}{E_s} + \frac{\partial}{\partial \sigma} \varepsilon_{MS}(H, \sigma).$$

Abbildung ii veranschaulicht den typischen Zusammenhang zwischen Magnetisierungszustand  $J_H$  (orange Kurve) und effektivem Elastizitätsmodul  $E_H$  (blaue Kurve): Bei endlicher Magnetisierung unterhalb der ferromagnetischen Sättigung ist  $E_H$  stets kleiner als der reine Elastizitätsmodul  $E_s$  des Materials. Dieser sogenannte  $\Delta E$ -Effekt bildet die physikalische Grundlage für die Funktion der akustomagnetischen Etiketten und die diesbezügliche Optimierung der Eigenschaften des Resonatorwerkstoffes.



**Abb. ii:** Magnetisierungszustand  $J_H$  (orange Kurve) und effektives Elastizitätsmodul  $E_H$  (blaue Kurve) in Abhängigkeit des magnetisierenden Feldes  $H$ .

Waren würden automatisch registriert und abgerechnet. Bis dahin ist es jedoch noch ein relativ weiter Weg. Die zugehörige Technologie ist ungleich aufwändiger und, soweit im Ansatz zum Beispiel in Form von Mikrochips bereits vorhanden, momentan auch wesentlich teurer als die heutigen Weg-Werf-Billig-Etiketten.

### Literatur

- [1] A. J. Minasy, Method And Apparatus For Article Theft Detection, United States Patent 3,500,373 (1966)
- [2] G. J. Lichtblau, Electronic Security System, United States Patent 3,810,147 (1974)
- [3] J. Welsh und R. N. Vaughan, Article Surveillance, United States Patent 4,063,229 (1977)
- [4] R. C. O'Handley, J. of Materials Engineering and Performance **2**, 211 (1993)
- [5] H. R. Hilzinger und G. Herzer, Amorphous Alloy For Strip-Shaped Sensor Elements, United States Patent 5,037,494 (1991)
- [6] W. Ho und J. Yamasaki, Deactivable/Reactivable Magnetic Marker Having a Step Change in Magnetic Flux, United States Patent 5,313,192 (1994)
- [7] G. Herzer und G. Rauscher, Elongated Member Serving as a Pulse Generator in an Electromagnetic Anti-Theft or Article Identification System and Method for Manufacturing Same and Method for Producing a Pronounced Pulse in The System, United Staes Patent 5,757,272 (1998)
- [8] F. B. Humphrey, Article Surveillance Magnetic Marker Having a Hysteresis Loop With Large Barkhausen Discontinuities, United States Patent 4,660,025 (1987)
- [9] R. L. Copeland, M. Kopp und R. C. O'Handley, IEEE Transactions Magnetics **30**, 3399 (1994)

- [10] N.C. Liu, M. R. Lian und J. Cantey, Transverse Magnetic Field Annealed Amorphous Magnetomechanical Elements For Use In Electronic Article Surveillance and Method of Making the Same, United States Patent 5,469,140 (1995)
- [11] G. Herzer, J. Magn. Magn. Mat. **A226-228**, 631 (1997)
- [12] G. Herzer, Amorphous Magnetostrictive Alloy And An Electronic Article Surveillance System Employing Same, United States Patent 5,841,348 (1998)
- [13] J. D. Livingston, phys. stat. sol. (a) **70**, 591 (1982)
- [14] G. Herzer, Method of Annealing Amorphous Ribbons And Marker For Electronic Article Surveillance, United Staes Patent 6,011,475 (2000)

Infos zu US-Patenten: [www.uspto.gov/patft/index.html](http://www.uspto.gov/patft/index.html)

Infos zum Thema Warensicherung unter: [www.checkpointsystems.com/](http://www.checkpointsystems.com/), [www.sensormatic.com/](http://www.sensormatic.com/), [www.sentrytechnology.com/](http://www.sentrytechnology.com/), [www.wallace.com/eas/um.asp](http://www.wallace.com/eas/um.asp)