

## VII. *Untersuchungen über den Magnetismus von Stahlstäben; von Dr. Carl Fromme.*

(Aus den Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen April 1875; vom Herrn Verfasser übersandt.)

Die folgenden Untersuchungen fanden ihre Veranlassung in der im Sommer 1873 von hiesiger philosophischen Facultät gestellten Preisaufgabe, welche „eine nähere Untersuchung des bei dem Magnetismus eines Stahlstabes vergänglichen Theils bei verschiedener Stärke des beharrlichen Theils und unter Einwirkung verschiedener Scheidungskräfte“ verlangte. In äusseren Verhältnissen sowohl als hauptsächlich in der Fülle des sich darbietenden Untersuchungsstoffs liegt der Grund, weshalb ich die vorläufigen Resultate erst jetzt mittheile.

Der Plan war nicht sowohl darauf gerichtet, durch Untersuchung vieler verschiedener Stahlsorten zur Erweiterung der Kenntniß der hier auftretenden Verschiedenheiten beizutragen, als vielmehr durch möglichst sorgfältige Untersuchung weniger aber guter Sorten zu theoretisch verwerthbaren Resultaten zu gelangen.

Es wurden zwei Stahlsorten benutzt, vom anfänglichen specifischen Gewicht:

- I. 7,8233
- II. 7,8348.

Von jeder wurden fünf Stücke geschnitten und dieselben in die Form verlängerter Rotationsellipsoide gebracht, so daß sich die Magnetisirungszahlen  $k$  mit Hülfe der Neumann-Kirchhoff'schen Formeln berechnen ließen. Die großen Axen der Ellipsoide wuchsen von circa 80 bis 200 Mm., die Länge der kleinen Axen war bei den vier ersten Stücken circa 25 Mm., bei dem fünften circa 20 Mm.

Eine Vergleichbarkeit der mit den einzelnen Ellipsoiden einer Sorte erhaltenen Resultate untereinander schien bei der großen Homogenität der Stücke von vorn herein

möglich: Der größte Unterschied der specifischen Gewichte betrug bei der ersten Sorte anfänglich 0,0078 und nach der ersten Ausgleichung 0,0022, entsprechend bei der anderen härteren Sorte 0,0022 und 0,0027.

Es wurde zuerst versucht, mit solchen magnetisirenden Kräften zu operiren, welche keinen remanenten Magnetismus nach Aufhören ihrer Wirkung hinterließen. Da die beiden Componenten der Erdkraft dieser Forderung genügten, so wurden die Ellipsoide nach der zuerst von Weber<sup>1)</sup> angegebenen und angewandten und später von Riecke<sup>2)</sup> bei der Magnetisirung weicher Eisenstücke benutzten Methode der Induction durch die Erde unterworfen.

Durch Benutzung sowohl der verticalen als der horizontalen Componente des Erdmagnetismus ergaben sich folgende Werthe der Magnetisirungsfuction  $k$  und des zugehörigen Arguments  $K$ . Die Ellipsoide sind hierbei nach zunehmenden Werthen ihrer Excentricität geordnet. Die Größe der Componenten der erdmagnetischen Kraft ist der Variationsformel von Kohlrausch<sup>3)</sup> entnommen. Der Werth von  $k$  ist meist das Mittel aus mehreren Einzelwerthen.

		Verticalcomponente:		Horizontalcomponente:	
		$k$	$K$	$k$	$K$
I.	1.	15,9974	0,2003	23,5034	0,0609
	2.	11,8461	0,3991	18,0285	0,1062
	3.	10,4328	0,5777	12,6030	0,2121
	4.	9,8564	0,8311	11,4105	0,3189
	5.	8,6826	1,3222	9,6467	0,5311
II.	1.	6,1380	0,5039	11,8347	0,1198
	2.	6,3318	0,6790	7,7361	0,2511
	3.	5,9333	0,9601	6,4746	0,3879
	4.	6,4917	1,1539	6,9191	0,4762
	5.	5,8772	1,6867	5,9691	0,7228

1) W. Weber im 6. Bande der Abh. d. Gesellsch. d. Wiss. zu Göttingen: Bestimmung der rechtwinkligen Componenten der erdmagn. Kraft in Göttingen in dem Zeitraum von 1834—1853.

2) Riecke, Beiträge zur Kenntniß der Magnetisirung des weichen Eisens. Diese Ann. Bd. 149.

3) Götting. Nachrichten 1868.

Die Betrachtung der jedem einzelnen Ellipsoid zugehörigen beiden Werthe zeigt, daß „die Magnetisirungs-  
„funktion  $k$  für Kräfte, welche keinen remanenten Ma-  
„gnetismus hinterlassen, abnimmt mit wachsender magneti-  
„sirender Kraft oder also, daß das magnetische Moment  
„langsamer wächst als die magnetisirende Kraft.“

Dieser Satz würde auch schon aus der getrennten Betrachtung der durch die beiden Componenten der Erdkraft erhaltenen Werthreihen, wenigstens bei der weiche-  
ren Sorte I, folgen, wenn es erlaubt wäre, die fünf Ellip-  
soide in ihren magnetischen Verhältnissen als gleich zu betrachten.

Es mag mit Bezug hierauf bemerkt werden, daß eine graphische Darstellung der mit I. erhaltenen beiden Werthreihen, in welcher die Argumente  $K$  die Abscissen, die Functionen  $k$  die Ordinaten geben, sowohl bei Benutzung der Einzel- als der Mittelwerthe ausgezeichnet regelmäßige Curven liefert.

Im Uebrigen wird man sich von dem Verlauf von  $k$  unter der Einwirkung solcher Kräfte, die keinen remanenten Magnetismus hinterlassen, folgende Vorstellung bilden können.

„Die Funktion  $k$  erhält zuerst bei verschiedenen gestreck-  
„ten Ellipsoiden sehr verschiedene Werthe, desto größere,  
„je geringer die Excentricität ist. Mit zunehmender Kraft  
„nähern sich diese abweichenden Werthe einem *kleineren*  
„Gränzwert, der um so früher erreicht wird, je härter  
„der benutzte Stahl ist.“

Die Ellipsoide wurden nun der magnetisirenden Einwirkung eines constanten galvanischen Stroms unterworfen, dessen Stärke von einem sehr kleinen Werth an allmählig gesteigert wurde.

Zweck der Versuche war, eine Gränze der magnetisirenden Kräfte zu ermitteln, unterhalb welcher aller Magnetismus eines Stahlstücks temporär wäre. Abgesehen davon, daß eine ganz scharfe Gränze der Natur der Sache nach auf experimentellem Wege niemals wird ermittelt

werden können, sind von Haus aus zwei verschiedene Möglichkeiten vorhanden: Entweder convergirt der remanente Magnetismus gleichzeitig mit der magnetisirenden Kraft gegen Null oder der remanente Magnetismus erreicht den Werth Null schon für einen endlichen Werth der magnetisirenden Kraft.

Bei meinen Versuchen war remanenter Magnetismus zuerst nachweisbar für folgende Werthe des Arguments  $K$  und der Stromstärke  $i$ :

		$K$	$i$			$k$	$i$
I.	1.	2,5	1,8	II.	1.	2,8	1,3
	2.	2,3	1,3		2.	2,0	0,8
	3.	2,4	0,8		3.	2,2	0,5
	4.	2,5	0,7		4.	2,0	0,4
	5.	2,8	0,5		5.	2,3	0,3
		Mittel 2,5				Mittel 2,26.	

Immerhin wird man also die Möglichkeit einer endlichen Werthen der magnetisirenden Kraft entsprechenden Gränze behaupten können, wenn man zugiebt, daß sich dieselbe bei weiterer Verfeinerung unserer Beobachtungsmittel mehr gegen die Null hinausschieben und schließlichs ganz verschwinden werde.

Unter der besagten Beschränkung werden dann die vorliegenden Beobachtungen als experimentelle Bestätigung der Maxwell'schen Theorie des remanenten Magnetismus dienen können<sup>1)</sup>.

Weitere Untersuchungen dieser Verhältnisse, in Verbindung mit der vorhin constatirten Annäherung von  $k$  an einen Grenzwert bei geringen magnetisirenden Kräften, werden ohne Zweifel zu wichtigen Aufschlüssen über die Magnetisirung des Stahls führen.

Es mag hier noch bemerkt werden, daß nach Entscheidung dieser Frage für die Ellipsoide der Sorte I noch einmal vermittelst Induction durch die Verticalcomponente

1) Maxwell, *Treatise on electricity and magnetism*. Vol. II, pag. 79.  
Cfr. Rowland, *Phil. Mag.* 1873, II., pag. 155.

die Zahl  $k$  berechnet wurde. Es ergaben sich als Beweis der Unveränderlichkeit ihres magnetischen Zustands die Werthe:

- |    |    |        |
|----|----|--------|
| I. | 1. | 15,592 |
|    | 2. | 11,596 |
|    | 3. | 10,702 |
|    | 4. | 10,004 |
|    | 5. | 8,965. |

Nach Beendigung dieser Versuche wurden die Stahlstücke successive wachsenden, immer im gleichen Sinne magnetisirenden, Kräften unterworfen.

Wiedemann<sup>1)</sup> hat schon bemerkt, daß wenn ein Eisen- oder Stahlstab zum ersten Mal durch galvanische Ströme magnetisirt wird, die während der Einwirkung der Ströme in demselben erzeugten temporären magnetischen Momente anfangs schneller wachsen, als die Intensitäten der Ströme und erst später einem Maximum sich zu nähern anfangen. Dies Verhalten sollte auch nach wiederholten Magnetisirungen und Entmagnetisirungen der Stäbe bei neuer Magnetisirung stattfinden.

Die angestellten Experimente zeigen nun, daß in diesem Verhalten auch dann keine Aenderung eintritt, wenn die remanenten Momente successive durch aufsteigende Kräfte erhöht werden.

II. 4.	Magnetis. Kraft $P$	Temporäres Mom. $P$
	13,32	103600
	22,82	103800
	71,31	107800
	94,65	108700
	111,2	109100.

Während so die temporären Momente schneller wachsen als die magnetisirenden Kräfte, wachsen wiederum die remanenten Momente rascher, als die temporären. Es nahm z. B. bei I. 5 das Verhältniß  $\frac{TM}{RM}$  — unter  $RM$  ist der ganze

1) Galvanismus, 2. Aufl. II, S. 350.

nach Aufhören der magnetisirenden Kraft zurückbleibende Magnetismus, also der schon vorhandene ( $UM$ ) vermehrt um den durch die Kraft erzeugten verstanden — von 34,5 bis 9,8 ab, wenn die Stromstärke von 1 bis 22 wuchs, bei II.5 von 16,4 bis 7,5, entsprechend einer Zunahme der Stromstärke von 4,1 bis 19,3.

Hieraus ergibt sich also auch, daß die remanenten Momente schneller wachsen als die magnetisirenden Kräfte und zwar nach dem Product der Verhältnisse

$$\frac{TM}{P} \quad \text{und} \quad \frac{RM}{TM}.$$

Es ist eine schon seit mehreren Jahren durch Frankenheim's<sup>1)</sup> Untersuchungen bekannte Thatsache, daß die Dauer der Einwirkung einer magnetisirenden Kraft von gar keinem Einfluß auf die GröÙe des remanenten Magnetismus ist, dagegen von sehr großer Wichtigkeit die Zahl der Einwirkungen derselben Kraft. Hat man dieselbe nur einmal wirken lassen, so hat man dadurch nicht das remanente Moment erreicht, welches dieselbe Kraft überhaupt, d. h. bei wiederholter Einwirkung zu erzeugen im Stande ist. Der remanente Magnetismus wächst durch jede folgende Einwirkung und nähert sich asymptotisch einem Gränzwert, über welchen hinaus dieselbe Kraft ihn nicht zu steigern vermag.

Hat ein Stahlstab so das mögliche Maximum des remanenten Magnetismus für eine bestimmte Stärke der magnetisirenden Kraft angenommen, so verhält es sich gegen alle Kräfte, von dieser bis zur Null wie ein Eisenstab ohne jede Coercitivkraft. Ist dagegen die Kraft  $P$  nur einmal zur Wirkung gelangt, dann zeigen die vorliegenden Beobachtungen, daß auch eine Kraft  $p$ , welche bis zu einem gewissen Verhältniß kleiner als  $P$  ist, das von  $P$  hinterlassene remanente Moment zu heben vermag.

Die Theorie von Maxwell<sup>2)</sup> ist also nur dann richtig, wenn die erste Kraft  $P$  den Stab auf das zugehörige

1) Diese Ann. Bd. 123, S. 49 ff.

2) A. a. O. S. 83 am Ende.

Sättigungsmoment des remanenten Magnetismus gebracht hatte.

Man wird demnach behaupten können:

„Für jedes remanente Moment eines Stahlstabs existiren „von der Null an eine Reihe von Kräften, gegenüber welchen der Stahlstab die Eigenschaften des weichen Eisens „besitzt.“

Um zu prüfen, ob das letztere wirklich in aller Strenge gültig sey, wurden einige Versuche zur Berechnung der Magnetisirungsfuction  $k$  — nach der ersten Ausglühung — angestellt.

Die Ellipsoide wurden durch einen constanten Strom auf das zugehörige Maximum des remanenten Magnetismus gebracht und darauf succ. geringeren unterworfen. Haben sie die Eigenschaften des weichen Eisens erlangt, so muß nach den Gesetzen der Magnetisirung die Zahl  $k$  mit succ. abnehmenden Kräften ebenfalls abnehmen. Zwei Versuchsreihen mögen dies veranschaulichen.

I. 1.  $RM = 79320$ .

$P$	$k$	$K$
178,2	31,86	4,231
139,4	31,19	3,379
82,56	28,53	2,183
39,07	27,74	1,062.

I. 5.  $RM = 957000$ .

$P$	$k$	$K$
109,6	11,57	27,29
94,05	11,44	23,62
73,31	11,25	18,64
56,89	11,14	14,57
35,6	10,90	9,27
19,19	10,98	5,00.

Die so gefundenen Werthe von  $k$  befinden sich in guter Uebereinstimmung mit einer kurz vorher, nach der

1. Ausglühung, durch den Inductor erhaltenen Werthreihe, sie befolgen ebenfalls betreffs ihrer GröÙe wieder die im Eingang schon festgestellte Reihenfolge, welche zugleich die der Excentricitäten ist.

Die Anzahl der zur Erreichung des Maximums des remanenten Moments nöthigen Einwirkungen der magnetisirenden Kraft scheint sich in keine präcise Beziehung zu den beeinflussenden Factoren bringen zu lassen, da deren gar zu viele sind. Nur im Allgemeinen läßt sich die Regel aufstellen, „daß die Sättigung mit remanentem „Magnetismus desto früher erreicht wird, je weicher der „Stahl ist.“

Diese Regel wird aber wohl inbegriffen seyn in der zweiten, allgemeineren, wonach „die Anzahl der nöthigen „Wiederholungen wächst mit dem Verhältniß des erreichbaren remanenten Moments zu dem ursprünglichen vor „Einwirkung der Kraft bereits vorhandenen,“ denn dieses Verhältniß ist im Allgemeinen größer beim härteren Stahl.

Das scheint nun auch der Grund zu seyn, weshalb in einer jüngst erschienenen Arbeit<sup>1)</sup> zwei wesentlich verschiedene empirische Formeln für das durch eine der zur Erreichung des Maximums nöthigen  $n$  Einwirkungen erzeugte remanente Moment aufgestellt sind, je nachdem die Magnetisirung durch einen constanten galvanischen Strom oder durch Inductionsströme geschah. Die Verschiedenheit der Formeln liegt wohl nicht, wie der Verfasser zu glauben scheint, in den verschiedenen Methoden der Magnetisirung, sondern vielmehr darin, daß das eine Mal der Stab „*vierge de toute aimantation antérieure*“, das andere Mal mit einem bedeutenden ursprünglichen Magnetismus versehen war.

Die erwähnte Arbeit von Frankenheim war zu dem Resultat gelangt, daß bei frisch ausgeglühten Stäben das durch jeden einzelnen Impuls erreichte remanente Moment  $R_r$  zu dem Maximalmoment  $R$  in einem constanten

1) *Bouty, Études sur le magnétisme. Annales de l'école normale* 1875. No. 1.



Verhältniß steht, welches unabhängig ist von den Dimensionen der Stäbe, von ihrer Härte und der Stärke der einwirkenden Kraft.

Meine Versuche zeigen nun, daß dies auch für nicht frisch geglühte, mit einem ursprünglichen Magnetismus  $U$  versehene Stäbe, also ganz allgemein gilt.

	$\frac{U + R_1}{U + R}$		$\frac{U + R_1}{U + R}$
I.	1. 0,955	II.	1. 0,910
	2. 0,942		2. 0,934
	3. 0,935		3. 0,941
	4. 0,968		4. 0,942
	5. 0,918		5. 0,928
	<hr/> 0,944		<hr/> 0,931

Hauptmittel = 0,937.

Die für die einzelnen Ellipsoide gegebenen Zahlen sind die Mittel aus den für verschiedene magnetisirende Kräfte erhaltenen Einzelwerthen, welche keine Abhängigkeit von der GröÙe der Kraft oder des ursprünglichen Moments zeigten. Dagegen nimmt das Verhältniß  $\frac{R_1}{R}$  ab, wenn das ursprüngliche Moment  $U$  wächst, wie auch ohne Weiteres aus der gefundenen Constanz von  $\frac{U + R_1}{U + R}$  zu folgern ist.

Bei allen solchen wiederholten Magnetisirungen durch den gleichen Strom ist jedoch eins zu bemerken:

„Daß der *ganze* Magnetismus fortwährend unverändert bleibt, daß also genau das, was an remanentem Magnetismus gewonnen, am temporären eingebüßt wird.“

Der vorher ausgesprochene Satz, daß eine Kraft von bestimmter Stärke remanenten Magnetismus nicht über eine bestimmte Gränze hinaus erzeugen könne, erleidet jedoch eine wesentliche Ausnahme.

Ist nämlich ein Stab bis zur Sättigung magnetisirt, verliert er dann durch äußere Umstände an remanentem Magnetismus und wird er darauf wieder der früheren magnetisirenden Kraft unterworfen, so wächst jetzt das rema-

nente Moment über die frühere Gränze hinaus. Ebenso vermag in einem solchen Falle eine schwächere Kraft, die vorher bei erreichtem Maximum so wenig als die magnetisirende Kraft eine Steigerung hervorbringen konnte, das verminderte remanente Moment zu heben und, wenn sie stark genug ist, auf das frühere Maximum zurückzubringen.

Die Entscheidung einer anderen sich aufdrängenden wichtigen Frage, wie in dem besprochenen Falle, wo die Inductionsfähigkeit an remanentem Magnetismus zunahm, das temporäre Moment ausfallen werde, muß ich mir noch vorbehalten, sowie ich überhaupt die Untersuchungen auf diesem noch so sehr dunklen Gebiet noch nicht für abgeschlossen halten möchte.

### VIII. Ueber die permanent magnetischen Momente der Magnetstäbe und die Haecker'sche

Formel:  $T = \rho \sqrt[3]{Q} + \sqrt[6]{l}$ ; von L. Kulp  
in Darmstadt.

Man hat dieser von Haecker (diese Ann. Bd. 57, S. 336) aufgestellten, von mir seiner Zeit bestätigten Formel, (in welcher  $T$  die Schwingungsdauer eines geradlinigen Magnetstabes,  $Q$  sein Gewicht,  $l$  die Länge desselben und  $\rho$  einen vom Materiale abhängigen Factor bedeutet) den Vorwurf gemacht, daß dieselbe jeglichen Zusammenhanges mit der mathematischen Theorie des Magnetismus entbehre. Die Isolirtheit derselben ist jedoch nur eine scheinbare, wovon man sich leicht überzeugen kann, wenn man statt der Schwingungsdauer in der obigen Formel, die betreffenden magnetischen Momente einführt.