

Die Bedeutung des Unterbrechungsfunkens für das Funktionieren elektromagnetischer Stromunterbrecher.

Paul Ehrenfest (Göttingen-Wien).

Soweit mir bekannt ist, weichen die Lehrbücher der Physik — sowohl die elementaren als die für den höheren Unterricht bestimmten — in der Funktionserklärung der typischen Stromunterbrecher nicht merklich von einander ab. Es dürfte, zumindest für didaktische Zwecke, interessant sein, festzustellen, daß diese allgemein übliche Erklärungsweise bei näherer Analyse eine wesentliche Schwierigkeit aufweist.

Benützt man nämlich allein jene Daten, die in die übliche Erklärungsweise aufgenommen werden, so gelangt man mühelos zu folgendem Resultat:

Die gesamte, während einer Bewegungsperiode vom Strom auf den Anker übertragene Arbeit wäre exakt gleich Null. Ein solcher Stromunterbrecher würde also nur solange schwingen, bis die ihm anfänglich etwa durch einen Stoß mitgeteilte Energie durch Reibungswiderstände etc. verzehrt wäre.

De facto funktionieren aber der Neef'sche Hammer, die elektrische Klingel etc. solange, als ihnen überhaupt Strom zugeführt wird.

Der Widerspruch löst sich sehr einfach: Gerade gewisse sekundäre Umstände, die in der üblichen Erklärung unerwähnt bleiben, sorgen **allein** dafür, daß die pro Periode vom Elektromagneten auf den Anker übertragene Gesamtarbeit nicht Null, sondern positiv wird. (Die Größen erster Ordnung tilgen sich bei Berechnung der Gesamtarbeit, also entscheiden die Größen zweiter Ordnung.)

Wir wollen durch explicite Diskussion der üblichen Erklärungsweise zunächst unsere erste Behauptung erweisen.

Als einfachsten Typus nehmen wir den Neef'schen Hammer. Der Anker möge sich horizontal bewegen, also der Schwere entzogen sein. Die Feder sei so eingestellt, daß bei Stromlosigkeit der Anker eben noch mit gelindem Druck auf dem Kontakt aufliegt. Fließt aber ein merklicher Strom durch den Elektromagneten, so wird der Anker vom Kontakt abgehoben.

„ . . . wird der Strom geschlossen, so zieht der Eisenkern den Anker an, dadurch wird der Kontakt gelöst und der Strom unterbrochen. Die zurückschnellende Feder stellt den Kontakt wieder her; es erfolgt abermalige Anziehung u.s.w. — Die Feder gerät in eine regelmäßige Schwingung, infolge deren der Strom periodisch geschlossen und wieder geöffnet wird.“ (Riecke-Experimentalphysik.)

Es ist zunächst zu beachten, daß von Selbstinduktion, Hysterese, Funkenbildung etc. und ähnlichen sekundären Faktoren nicht gesprochen wird; also müssen wir sie auch bei einer Analyse obiger Erklärung beiseite lassen.

Wir wollen nun mit alleiniger Benutzung der in der Erklärung enthaltenen Daten die Kraft- und Arbeitsverhältnisse während einer vollen Schwingungsperiode des bereits im Gang befindlichen Unterbrechers verfolgen. Wir beginnen die Periode zu zählen von der Stellung an, in der der Anker am weitesten gegen den Kontakt angedrückt ist, und verfolgen den Anker während seiner Bewegung zum Elektromagneten hin — erste (Weg-) Hälfte der Periode — dann zurück, bis wieder zur Extremstellung — zweite (Weg-) Hälfte der Periode.

In jedem Punkte seiner Bahn steht der Anker unter der Wirkung zweier Kräfte: 1. der Federkraft, 2. der elektrischen Kraft. (Letztere verschwindet für den größten Teil seiner Bahn.)

Die Feder leistet natürlich in Summe keine Arbeit — so selbstverständlich das auch ist, sei es gestattet, die Begründung kurz zu geben, weil sie ein bequemes Analogon zu der darauffolgenden Ueberlegung bildet. Die Kraft, mit der die Feder auf den Anker wirkt, ist nämlich für Hin- und Rückweg ein und dieselbe Funktion der Ankerstellung. Ueberträgt sie in der zweiten Weghälfte der Periode auf einem bestimmten Wegelement ds auf den Anker die positive Arbeit

$$+ P ds,$$

so entzieht sie in der zweiten Hälfte der Periode innerhalb desselben Wegelementes ds gerade dasselbe Arbeitsquantum dem Anker, und zwar deshalb, weil P für eine und dieselbe Stellung des Ankers unabhängig davon, in welcher Richtung die betreffende Stellung durchlaufen wird, einen bestimmten Wert besitzt. Die Gesamtarbeit der Feder während einer vollen Periode ist also Null.

Bei Feststellung der magnetischen Kraft wollen wir nun peinlich der oben zitierten Erklärung folgen. Nur ersetzen wir den sprungweisen Uebergang von „Kontakt“ zu „Nicht-Kontakt“ durch eine kontinuierliche, aber rapide Aenderung des Leitungswiderstandes von einem sehr kleinen Wert („der Kontakt ist geschlossen“) zu einem praktisch unendlich großen („der Kontakt ist unterbrochen“).

Da jene Erklärung den Unterbrechungsfunken ignoriert, so muß ihn auch unsere Diskussion ignorieren: dann aber ist für alle jene ungemein nahe benachbarten Stellungen, in denen der „Kontakt geschlossen“ ist, der Ohmsche Widerstand eine bestimmte Funktion der Ankerstellung, und zwar dieselbe für den Hin- und für den Rückweg.

Da weiter jene Erklärung durchaus nicht etwa Selbstinduktion oder Hysterese berücksichtigt, so arbeitet sie implicit mit dem einfachen Ohmschen Gesetz und der Annahme, daß die magnetische Kraft nur Funktion der augenblicklichen Stromintensität ist. Also behauptet jene Erklärung implicit, daß nun auch die magnetische Kraft (ebenso wie die Kraft der Feder) allein Funktion der Ankerstellung ist, unabhängig davon, in welcher der beiden Richtungen die betreffende Ankerstellung durchlaufen wird.

Dann aber läßt sich mit kleinen Aenderungen die schon für die Feder durchgeführte Arbeitsbilanz wiederholen: Nun leistet der Magnet innerhalb eines bestimmten Wegelementes während der ersten Hälfte der Periode die positive Arbeit Mds , indem er den Anker an sich heranzieht — entzieht ihm aber in der zweiten Hälfte innerhalb desselben Wegelementes genau dieselbe Arbeit Mds , indem er den Anker zurückzuhalten strebt — und dies gilt für jedes einzelne Element der Bahn (für einen Teil der Bahn ist überdies $M = 0$).

Danach würde also nicht nur die Feder, sondern auch der Elektromagnet im Verlauf einer Periode in Summe keine Arbeit auf den Anker übertragen. So müßte der Anker den ihm anfänglich mitgeteilten Energieinhalt durch Reibung etc. verlieren und bald zur Ruhe kommen.

Schon die Frage, in welcher Stellung er denn überhaupt ruhen könnte, zeigt, wo der Fehler steckt: Der Uebergang von Kontakt zu Nicht-Kontakt muß irgend ein unsymmetrisches Element enthalten, das in der üblichen Erklärung unerwähnt bleibt. Dieses und vielleicht noch andere in der Erklärung ignorierte Elemente müssen die Symmetrie zwischen erster und zweiter Periodenhälfte stören. Denn die Symmetrie hat das Verschwinden der Gesamtarbeit zur Folge.

Von diesen Faktoren führe ich allein die beiden an, die hier den Ausschlag zu geben scheinen: den Unterbrechungsfunken und vielleicht auch noch die Selbstinduktion.

Der Unterbrechungsfunke ist bekanntlich deutlich wahrnehmbar, der Schließungsfunke unmerklich. Der Unterbrechungsfunke hält als gute Stromleitungsbrücke in der ersten Hälfte der Periode, wo der Elektromagnet also positive Arbeit leistet, den Strom über eine beträchtliche Strecke der Ankerbahn hin auf merklicher Höhe — während dieser Bewegungsphasen bleibt der Elektromagnet unter Strom und leistet positive Arbeit.

Für den größten Teil derselben Stellen des Rückweges aber bleibt der Elektromagnet stromlos, weil erst in äußerster Nähe des Kontaktes der Strom wieder einsetzt (der Schließungsfunke ist unmerklich); während dieser Bewegungsphasen fehlt also die magnetische Kraft, die jetzt negative Arbeit leisten würde.

Die Asymmetrie zwischen Unterbrechungs- und Schließungsfunken garantiert also schon die Abgabe positiver Arbeit von Elektromagnet auf Anker.

Auch die Selbstinduktion wirkt im selben Sinn: in der Phase der Unterbrechung, also der positiven Arbeit, erhält sie den Strom noch auf einem etwas höheren Wert, als dem gleichzeitigen Ohmschen Widerstand entspräche, in der Phase der Schließung, also der negativen Arbeit, umgekehrt auf einem niedrigeren Wert, als dem gleichzeitigen Ohmschen Widerstand entspricht. Selbst wenn der Ohmsche Widerstand für Hin- und Rückweg dieselbe Funktion der Ankerstellung wäre, so würde also auch die Selbstinduktion für sich allein schon die Abgabe positiver Arbeit auf den Anker bewirken.

Auch die Hysterese wirkt im selben Sinn.

Eine rechnerische Abschätzung des relativen Gewichtes der verschiedenen Faktoren ist nicht möglich, da ja der Ablauf des Unterbrechungsfunkens hierzu zu wenig bekannt ist.

Eine experimentelle Entscheidung setzt voraus, daß durch geeignete Schaltungen rapide, beträchtliche Stromschwankungen bei Vermeidung von Unterbrechungsfunken hergestellt werden können.

Mir kam es nur darauf an, zu zeigen, daß die den üblichen Erklärungen entsprechende Wirkung unsere Hausglocken auch nicht zehn Sekunden lang in Schwung erhalten kann, solange nichts von Unterbrechungsfunken etc. gesagt wird — der Popularität der Erklärung zum Schaden.