

Physics. — *Messmethoden zur Untersuchung der Wärmeabgabe von Lokalheizapparaten, besonders Radiatoren I.* (Mitteilung aus dem Laboratorium der „Warmtestichting“ Utrecht, Physikalisches Institut.) Von E. F. M. VAN DER HELD und L. L. MULDER. (Communicated by Prof. L. S. ORNSTEIN.)

(Communicated at the meeting of February 27, 1932.)

Die totale Wärmeabgabe von Radiatoren wurde untersucht, wie auch die Wärmeabgabe durch Strahlung und durch Konvektion gesondert. Für die Bestimmung der totalen Wärmeabgabe wurde der Abkühlungsversuch als technisch am meisten brauchbar befunden und darum als Prüfungsmethode gewählt. Eine Messmethode zur Bestimmung der durch Konvektion abgeführten Wärme wird beschrieben. Die Strahlung wurde mit einer Thermosäule bestimmt. Der Abkühlungsversuch gab einen Wert, der 7 % über der Summe von Strahlung und Konvektion liegt.

Einleitung.

Es ist von grossem Interesse für die Praxis der Erwärmung von Lokalitäten, in die Weise, worauf eine Wärmequelle ihre Wärme an die Umgebung und vor allem an die hierin verweilenden Personen abgibt, Einsicht zu bekommen. Als wir denn auch beauftragt wurden Radiatoren zu untersuchen, haben wir uns auf den Standpunkt gestellt, dass wir nicht nur ihre Totalwärmeabgabe, sondern auch die Strahlung und die Konvektion getrennt zu messen hätten.

Die Gesamtwärmeabgabe.

Für diese Untersuchung galt es eine Messmethode zu finden, welche ohne kostspielig zu sein doch auf einfacher Weise möglichst genaue Resultate liefern konnte, wobei vorangesetzt war, dass der Vergleich zwischen den verschiedenen Radiatoren viel genauer sein müsste, als die Messung des Absolutwertes, welcher durch die Aufstellung des Radiators sehr stark beeinflusst wird und also leicht von den verschiedenen Umständen, unter denen gemessen wird, abhängt. Da der Arbeitsraum beschränkt war, werden die Endresultate durch die nicht idealen Umstände beeinflusst (unter „ideal“ hat man vollkommen freie Aufstellung in einer grossen Lokalität ohne eigene Konvektionserscheinungen in der Nähe des zu untersuchenden Objektes zu verstehen).

Man hat übrigens zu bedenken, dass Radiatoren nie unter solchen idealen Umständen gebraucht werden.

Wir prüften die folgenden Messmethoden :

A. Die Zirkulationsprobe.

Eine Pumpe C (Abb. I) pumpt das Wasser aus dem Reservoir B durch

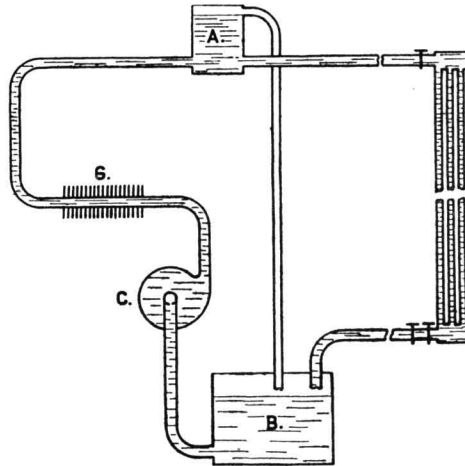


Abb. I

einen Geyser G, worin das Wasser so hoch wie möglich erwärmt wird in das Gefäss A. Dieses ist mit einem Übersturz versehen, wodurch das überflüssige Wasser wieder nach B zurückfliessen kann. Die Radiatoren können zwischen A und B mit Gummischläuche angeschlossen werden. Beide Schläuche sind in der Nähe des Radiators durch Glasröhren unterbrochen, worin Quecksilberthermometer so montiert sind, dass ihre Quecksilberreservoirs sich an der Seite des Radiators befinden. Diese Thermometer waren vorhin mit einem Standardthermometer geeicht. Der Übersturz sorgt dafür, dass der Druckunterschied und damit die Stromgeschwindigkeit des Wassers konstant bleibt. Aus Stromgeschwindigkeit und Temperaturerniedrigung ist die Wärmeabgabe des Radiators pro Stunde zu berechnen. Diese Grösse soll noch durch den mittleren Temperaturunterschied zwischen Wasser b.z.w. Radiatoroberfläche und Umgebung geteilt werden, um die Wärmeabgabe pro Grad Celsius und pro Stunde zu bekommen. (Unsere Werte sind immer auf die mittlere Oberflächentemperatur des Radiators bezogen, was einen Unterschied von ungefähr 5 v. H. mit den aus der mittleren Temperatur des Wassers berechneten Werten gibt. (Siehe für Oberflächentemperaturmessungen a.a.O.)

Eine grosse Schwierigkeit dieser Methoden ist, dass die Temperatur des einströmenden Wassers sicher wohl während einiger Stunden keine grösseren Variationen aufweisen darf, als etwa einen halben Grad (3 v. H. vom Temperaturunterschied zwischen ein- und ausströmendem Wasser), weil infolge des grossen Wasserwertes des Radiators und der langen Zeit, während welcher das Wasser im Radiator bleibt, die Temperatur vom ausströmenden Wasser erst viel später und dann noch sehr langsam den

Temperaturschwankungen des einströmenden Wassers folgt. Will man also diese Messung genau machen, dann soll man das Wasser elektrisch erwärmen, wofür eine konstante Spannung nötig ist, und den Gebrauch einer Pumpe unterlassen, weil die Drehzahlvariationen Temperaturschwankungen veranlassen können.

B. Der Abkühlungsversuch.

Mit der vorher beschriebenen Aufstellung wird der Radiator angeheizt. Sobald der Radiator warm genug ist, werden Zu- und Abfuhrhähne geschlossen und der Radiator sichselber überlassen. Mit einem thermoelektrischen Oberflächenthermometer (siehe weiter hin) wird die Abkühlung des Radiators verfolgt. Aus den Messungen der Temperatur an z.B. vier Messstellen des Radiators (zwei oben und zwei unten) wird das Temperaturmittel des Radiators in jedem Zeitpunkt bestimmt.

Ist W der Wasserwert des mit Wasser gefüllten Radiators in k kal pro Grad Celsius, k die Wärmeabgabe pro Grad Celsius und pro Stunde, t die Zeit nach dem Schliessen der Hähne, und θ der Temperaturunterschied zwischen Radiatoroberfläche und Umgebung, dann ist :

$$- W \frac{d\theta}{dt} = k\theta.$$

Setzt man voraus, dass k unabhängig von θ und von der absoluten Temperatur ist, was eine grobe Annäherung darstellt, dann ist :

$$\log. \text{ nat. } \frac{\theta_0}{\theta} = \frac{k}{W} t.$$

worin A , der Temperaturunterschied beim Anfang des Versuches bezeichnet.

Trägt man $\log. \text{ nat. } \frac{\theta_0}{\theta}$ gegen t auf (Abb. 2), dann findet man eine schwach gekrümmte Kurve. Die Neigung der Kurve bei einem bestimmten Temperaturunterschied ist gleich $\frac{k}{W}$ bei diesem Temperaturunterschied.

Kennt man nun W durch Wägung des gefüllten und des ungefüllten Radiators (spezifische Wärme des Eisens wurde bestimmt auf 0.12 k kal/kg), dann findet man auf diese Weise k in Abhängigkeit von θ (Abb. 3). Je weniger die gebrauchte Lokalität eigene Konvektionserscheinungen aufweist umso stärker hängt k von θ ab (Bei eigenen Konvektionserscheinungen der Lokalität wird k nicht unter einen bestimmten Wert sinken können, während theoretisch der Wert bis auf den durch die Strahlung gegebenen, d.h. etwa $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{4}$ von jenen bei grösseren, praktisch mehr vorkommenden Temperaturunterschieden sinken soll).

Da das Zeichnen der Kurve und der Tangente in einem Punkt ungenaue

Ergebnisse gab, wurde an der Hand von nachstehenden Berechnungen eine andere graphische Methode gewählt um diesen Mangel zu beseitigen.

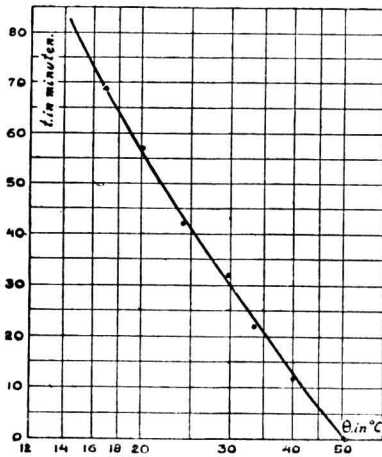


Abb. 2

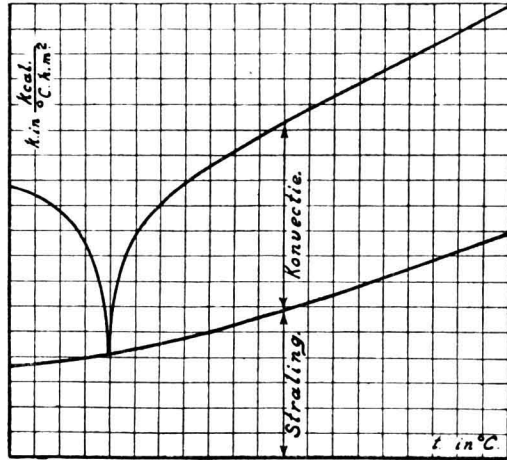


Abb. 3

Sei T_0 die absolute Umgebungstemperatur (z.B. 290° Kelvin) dann ist, weil die Strahlung proportional der Differenz zwischen den vierten Potenzen der absoluten Temperaturen von Radiatoroberfläche und Umgebung ist, der Übergangskoeffizient der Strahlung:

$$k_{str} = A \frac{(T_0 + \theta)^4 - T_0^4}{\theta} = 4AT_0^3 \left\{ 1 + \frac{3}{4} \frac{\theta}{T_0} + \left(\frac{\theta}{T_0} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\theta}{T_0} \right)^3 \right\}$$

Setzen wir in Einklang mit anderen Konvektionserscheinungen voraus, dass die Konvektion proportional der Potenz $5/4$ des Temperaturunterschiedes zwischen Radiatoroberfläche und Umgebung ist, dann beträgt die Konvektionswärmeübergangszahl:

$$k_c = B \frac{\theta^{5/4}}{\theta} = BT_0^{1/4} \left(\frac{\theta}{T_0} \right)^{1/4}$$

Sei: $\gamma = \frac{BT_0^{1/4}}{4AT_0^3}$ dann ist die totale Wärmeübergangszahl:

$$k = k_{str} + k_c = 4AT_0^3 \left\{ 1 + \frac{3}{4} \frac{\theta}{T_0} + \left(\frac{\theta}{T_0} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\theta}{T_0} \right)^3 + \gamma \left(\frac{\theta}{T_0} \right)^{1/4} \right\}$$

Im ungünstigsten Fall, dass die Strahlung gleich der Konvektion ist, macht man, wenn man die Glieder $\left(\frac{\theta}{T_0} \right)^2$ und $\frac{1}{4} \left(\frac{\theta}{T_0} \right)^3$ vernachlässigt, einen Fehler von 1.6 v.H. bei einem Temperaturunterschied θ von 57° C.

Die Differentialgleichung für den abkühlenden Radiator lautet nun:

$$-W \frac{d\theta}{dt} = 4AT_0^3 \left\{ 1 + \frac{3}{4} \cdot \frac{\theta}{T_0} + \gamma \left(\frac{\theta}{T_0} \right)^{1/4} \right\} \theta$$

oder :

$$t = - \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{W d\theta}{4AT_0^3 \theta \left\{ 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\theta}{T_0} + \gamma \left(\frac{\theta}{T_0} \right)^{1/4} \right\}}$$

Hierin ist θ_0 der Temperaturunterschied zwischen Radiatoroberfläche und Umgebung beim Anfang des Versuches.

Dieser Integral wurde ausgerechnet für die Fälle :

- 1^o. $\gamma = 0$ (nur Strahlung).
- 2^o. $\gamma = 1.94$.
- 3^o. $\gamma = 4.0$.
- 4^o. nur Konvektion (der Nenner vom Integranden wird dann $B \theta^2$).

Alle bis jetzt untersuchten Radiatoren haben einen γ Wert zwischen 1.94 und 4.0.

Hieraus wurde zunächst das Verhältnis zwischen der wahren Zeit die zur Abkühlung von $\theta_0 = 57^\circ$ (60° Unterschied zwischen mittlerer Wasser- und Umgebungstemperatur) auf eine andere Temperatur nötig ist und der Zeit, welche zur Abkühlung über demselben Temperaturbereich nötig sein würde, im Falle dass die Wärmeübergangszahl ihren Wert bei $\theta = 57^\circ$ immer beibehalten würde, berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 4 aufgetragen. Aus dieser Abbildung geht klar hervor, dass schon eine grobe Schätzung von γ genügt, um die genauen Zeitreduktionszahlen

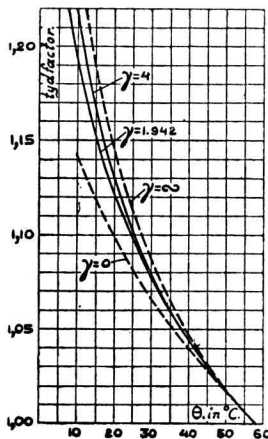


Abb. 4

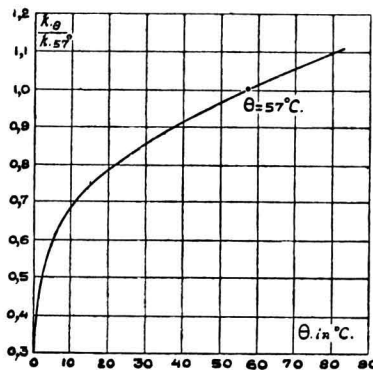


Abb. 5

zu bekommen. Für einen bestimmten Typus von Radiatoren kann man immer mit denselben Reduktionszahlen rechnen.

In der Prüfungspraxis wird ein etwas anderer Weg eingeschlagen, indem der mittels der vorhergehenden Argumentation gefundene Schluss gebraucht wird, dass eine grobe Schätzung von γ schon zum Erlangen von guten Resultaten genügt.

In Abbildung 5 ist aufgetragen :

$$\beta = \frac{k}{k_0} = \frac{1 + \frac{3}{2} \frac{\theta}{T_0} + \left(\frac{\theta}{T_0}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\theta}{T_0}\right)^3 + \gamma \left(\frac{\theta}{T_0}\right)^{1/4}}{1 + \frac{3}{2} \frac{\theta_0}{T_0} + \left(\frac{\theta_0}{T_0}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\theta_0}{T_0}\right)^3 + \gamma \left(\frac{\theta_0}{T_0}\right)^{1/4}}$$

Hat man jede fünfte Minute die Radiatortemperaturen gemessen, dann kann man für jeden von diesen Zwischenräumen die mittlere Temperatur bestimmen, das hierzu gehörende β vom Diagramm ablesen und hiermit das Zeitintervall multiplizieren. Trägt man jetzt die Logarithmen der gefundenen Temperaturen gegen die Summe der nach dem Anfang des Versuches vergangenen, reduzierten Zeitintervalle auf dann soll man, falls die im Anfang gemachte Voraussetzung über der Konvektion zutrifft, eine Gerade finden, was tatsächlich wie die Versuche ergaben der Fall war. (Abb. 6.)

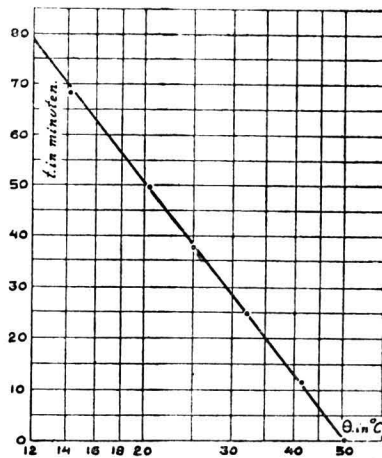


Abb. 6

Nach dieser Methode wird also an erster Stelle die Wärmeübergangszahl bei 57° Temperaturunterschied mit der Umgebung ermittelt, und an zweiter Stelle mit Hilfe des Faktors β auch diejenige für andere Temperaturunterschiede. Die Genauigkeit ist durch diese Rechenweise viel verbessert; beträgt die Unsicherheit beim ziehen der Gerade maximal 2 v.H.

Die leichte Ausführbarkeit, wie auch die gute Reproduzierbarkeit der Probe veranlasste uns in der Praxis immer die Abkühlungsprobe anzuwenden.

Das Tastthermometer.

Das Instrument (Abb. 7a) besteht aus einem vollständigen Thermo-
element von Konstantan und Manganin, wobei die Konstruktion einer der
beiden Lötstellen so geschehen ist, dass den widerstreitenden Anforde-

rungen an geringe Wärmekapazität (also dünne Drähte u.s.w.) und Beständigkeit gegen Abnutzung und andere mechanische Beschädigung so gut wie möglich genügt ist. Das Material ist runder und blanker Draht



Abb. 7a

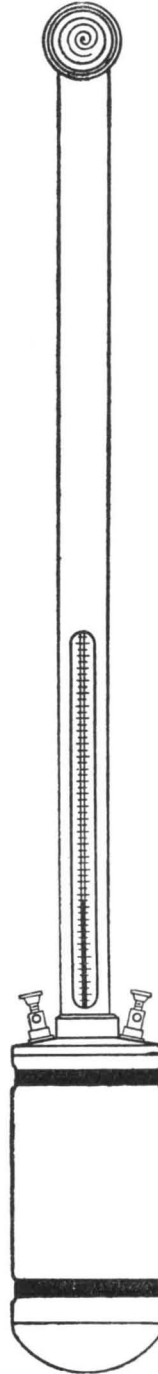


Abb. 7b

von ca. 0.2 mm. Die Verbindung von Manganin und Konstantan ist mit Silber gelötet im Mittelpunkte einer flachen Spirale von Stahlblech, 0.25 mm. dick, welche den Boden einer Dose bildet (Abb. 7b). Diese Dose ist mit einer Glimmerplatte geschlossen, sodass die Lötstelle vor Abkühlung durch Luftkonvektion geschützt ist. Die Thermodrähte werden jeder ca. 1.5 cm. durch die Dose hindurchgeführt, welche übrigens leer ist. Sie verlassen sie durch zwei durch den Glimmer gebohrte Löcher.

Die zweite Lötstelle ist zusammen mit dem Quecksilberreservoir eines gewöhnlichen Thermometers in einem mit Wasser gefüllten Gefäss eingeschlossen, das sich im gut isolierten Griff befindet, sodass bei den kleinen Temperaturfluktuationen, welche ausserdem nur langsam in das Gefäss dringen, die Temperaturen von Lötstelle und Wasser immer gleich zu setzen sind.

In Abbildung 7b ist überdies zu sehen, wie die oben beschriebene Dose federnd am Ende der Metallhülse des Quecksilberthermometers befestigt ist. In dieser Hülse sind zugleich die Drähte des Thermoelementes untergebracht. Das Verbindungsstück von Hülse und Griff trägt die Anschlussklemmen für die Galvanometerdrähte. Man misst also immer den Temperaturunterschied zwischen den Lötstellen in der Dose und im Griff. Drückt man nun die Dose gegen einen Gegenstand von welchem man die Oberflächentemperatur bestimmen will, dann stellt sich das freie Ende der Spirale auf das thermische Gleichgewicht zwischen der Wärmezufuhr aus den oberen Schichten des Gegenstandes und der sehr geringen Wärmeabfuhr längs der Spirale selbst ein. Die Abweichung bei flachen metallenen Gegenstände beträgt ca. 3 % wobei die Einstellungszeit im ganzen etwa 6 Sekunden ist. Je nachdem die Temperaturleitfähigkeit des abgetasteten Materials kleiner und die Oberfläche weniger flach ist, nimmt die Einstellungszeit zu und ebenso der Beobachtungsfehler. Da die leichte Konstruktion der Dose es erlaubt, für die Erwärmung des Apparates die unmittelbare Umgebung der Messstelle zu gebrauchen, ist die Störung in der schliesslich betasteten eigentlichen Messstelle sehr gering und die Einstellungszeit bei Isolationsmaterialien nicht mehr als zirka 2 Minuten. Der Fehler bei Isolationsmaterialien beträgt nach Untersuchungen, bei welchen die Dose an der selben Stelle während längerer Zeit angelegt blieb, weniger als 1 v.H., bei natürlicher Konvektion. Bei grossen Luftgeschwindigkeiten wird er grösser, doch nicht mehr als 10 v.H.

Ergebnisse des Abkühlungsversuches.

In Abb. 6 sind die Resultate eines Abkühlungsversuches wiedergegeben nachdem die Messdaten der beschriebenen Methode gemäss korrigiert sind. Nach drei gesonderten Wahrnehmungen betrug die Wärmeabgabe bei einer Oberflächentemperatur von 57° C. über der Umgebung:

1080 k kal/st.

Der Wasserwert wurde bestimmt durch Wägung des leeren und des

betriebsfertigen gefüllten Radiators. Die spezifische Wärme von Gusseisen (0.12) wurde mit der Eintauchmethode gemessen.

Konvektionsmessung (Angestellt von Herrn J. J. WENT).

Bei dieser Messung gingen wir von dem Gedanken aus, dass alle erwärmte Luft aufsteigt und eine dicht über dem Radiator gedachte Horizontalebene passiert. Die Geschwindigkeits- und die Temperaturverteilung in dieser Ebene wird gewiss ein orientierendes Bild über die Konvektion des Objektes geben.

Multiplizieren wir die senkrecht auf der Ebene gerichtete Geschwindigkeitskomponente mit der aus der Temperatursteigerung der Luft berechneten aufgenommenen Wärme so erhalten wir die durch die Konvektion abgeführte Wärme.

Man kann die Messungen zerlegen in :

1. Die Geschwindigkeitsbestimmung der aufsteigenden Luft.
2. Die Temperaturbestimmung der aufsteigenden Luft.
(Differenz mit der Zimmerluft).

Geschwindigkeitsmessung.

Beschreibung des benutzten Apparates.

Für die Geschwindigkeitsmessung wurde der in Abb. 8 gezeichnete

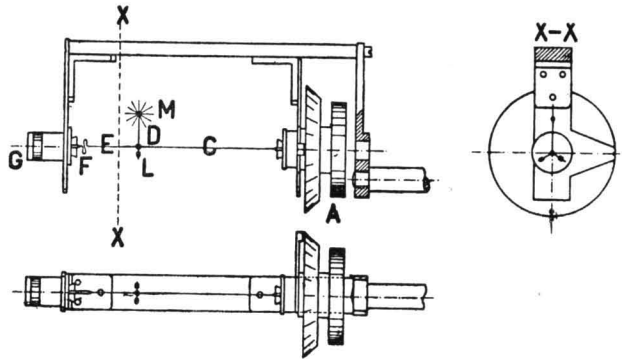


Abb. 8

Torsionsapparat benutzt. Er besteht aus 12 Glaswolldrähten (Länge etwa 20 mm.), welche in einer Ebene bei *M* radial mit ein wenig Schwefel an einander verkittet sind. In der Ebene des so entstehenden „Sternchens“ wurde bei *M* auch noch ein Stahlstäbchen befestigt, das eine Balanzierungseinrichtung trägt, bestehend aus zwei Gewichten, die auf zwei senkrecht zueinander stehenden Spindeln angeschraubt sind. In dieser Weise kann der Schwerpunkt des ganzen Systems in *D* gelegt werden, d.h. in einer Linie mit dem Torsionsdraht (Sibronze von 27 μ Durchmesser). Die Torsionsdrähte *C* und *E* sind 45 b.z.w. 15 mm. lang, *E* ist mittels einer Feder *F* am festen Punkt *G* befestigt, während *C* direkt mit dem Torsionsknopf verbunden ist.

Befindet das Sternchen sich in einem senkrecht auf seine Ebene gerichteten Luftstrom, so wird die Luft dem Sternchen einen Ausschlag geben. Mit dem Torsionsknopf wird es in seine Nullage zurück gedreht. Der Winkel um den man den Knopf drehen muss, ist ein Mass für die Luftgeschwindigkeit. Der Drahtteil E ist bei der Nullage immer torsionsfrei und konnte darum kurz gehalten werden, damit das Ganze eine grössere Stabilität bekommt, wenn der Knopf stark gedreht wird (500° für die höchsten Geschwindigkeiten). Es genügen dann schon kleine Variationen der Geschwindigkeit, um das System umzuschlagen. Aus demselben Grund benutzten wir runder Draht, der bei grossen Torsionswinkeln am wenigsten zum Ausbiegen oder Knicken neigt.

Das ganze System wurde so leicht wie möglich gemacht, damit Trägheitsmoment und Einstellzeit gering werden. Die Form des Sternchens sorgt selber für einige Dämpfung. Die Abmessung des Sternchens wurde nicht grösser genommen um nicht zu grosse Gebiete auf einmal zu messen.

Die Form ist so, dass die Kraft auf dem Sternchen etwa der Luftgeschwindigkeit proportional ist, und die Abhängigkeit des Einfallswinkels (der Winkel zwischen Geschwindigkeit und Normale der Systemebene in der Nullage) sowie die Temperaturabhängigkeit des Verhältnisses zwischen Kraft und Geschwindigkeit durch einfache Funktionen vorzustellen sind (siehe unten).

Fortsetzung folgt.
