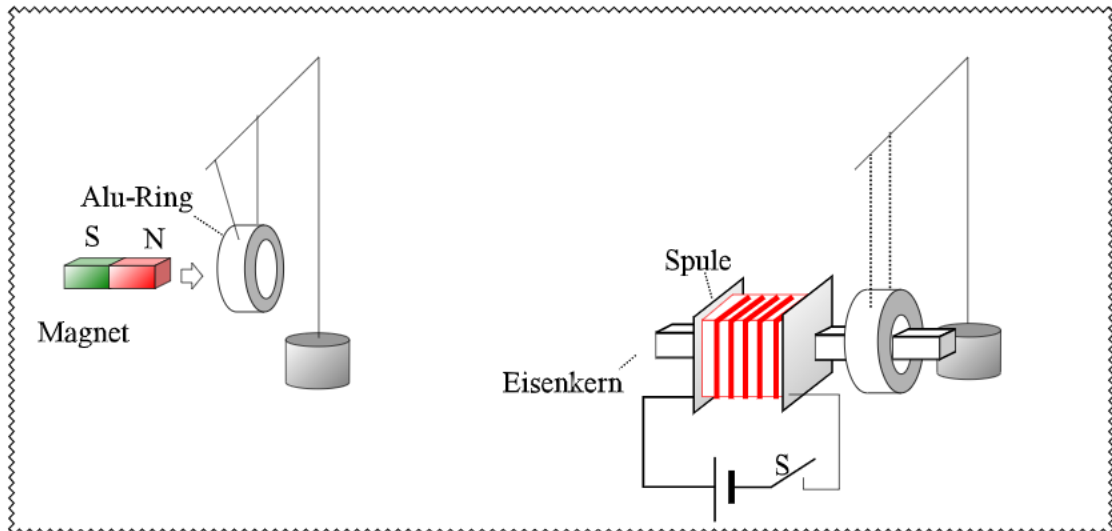


## Die Lenzsche Regel

Frage : In welche Richtung fließt der Induktionsstrom ?

Versuch :



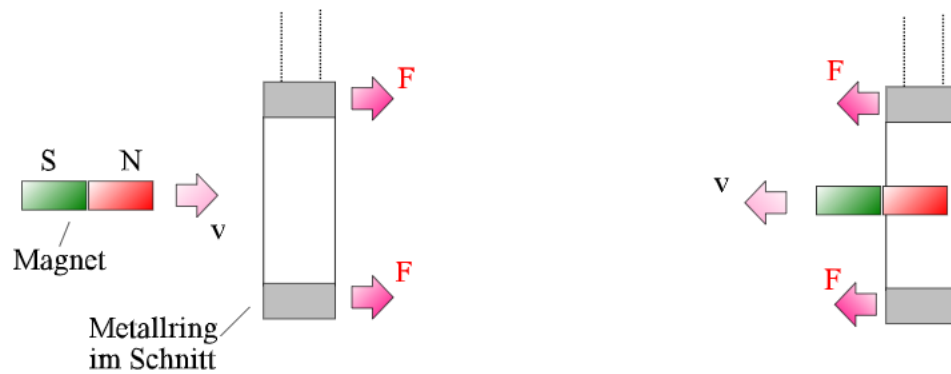
Beobachtung :

Bewegungsrichtung des Magneten	Bewegungsrichtung des Metallringes
in den Ring hinein	wird vom Magneten abgestoßen
aus dem Ring heraus	wird zum Magneten hingezogen
Schalter S wird	
geschlossen (Strom wird eingeschaltet)	wird von der Spule abgestoßen
geöffnet (Strom wird ausgeschaltet)	wird von der Spule angezogen

Wir wissen	
Um einen stromdurchflossenen Leiter entsteht ein kreisförmiges magnetisches Feld (vgl. Oerstedt-Versuch)	Ändert sich das magnetische Feld in einer Leiterschleife (durch Bewegung des Magneten oder Ein- und Ausschalten des Spulenstromes), so ändert sich der magnetische Fluss in dem Metallring.
Zwischen magnetischen Feldern wirken Kräfte!	Nach dem Induktionsgesetz wird im Ring eine Spannung induziert.

Für die folgenden Überlegungen wird der Metallring als eine kurzgeschlossene Leiterschleife betrachtet.

Erklärung der Bewegungsrichtung :

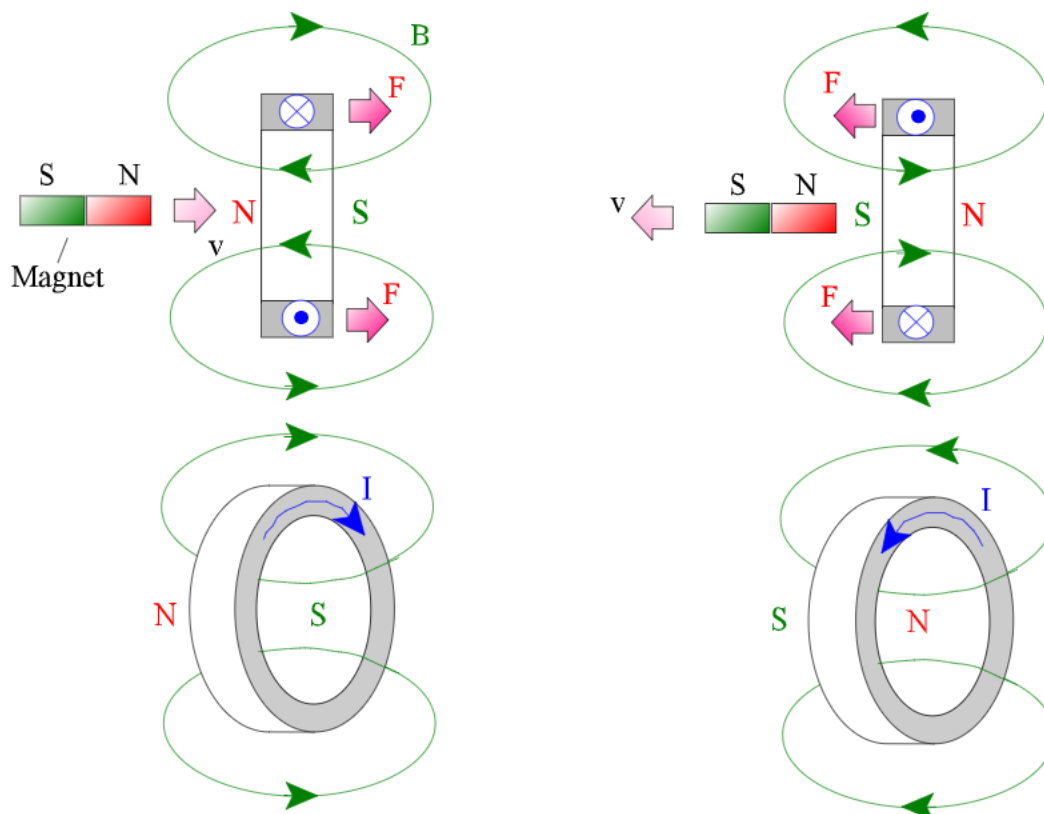


Wird der Magnet mit seinem Nordpol in die Leiterschleife hinein bewegt, so bewegt sich die Leiterschleife in die gleiche Richtung (vom Magneten weg).

Dann muss aber in der Schleife aufgrund der Induktionsspannung ein Strom fließen, der ein Magnetfeld in der Weise zur Folge hat, dass dem Nordpol des Magneten der Nordpol des magnetischen Feldes - hervorgerufen durch den Induktionsstrom im Ring - gegenübersteht.

Wurde der Magnet anschließend aus der Leiterschleife heraus bewegt, so folgte die Leiterschleife der Bewegungsrichtung des Magneten. Dies ist nur möglich, wenn in der Schleife die Polarität des vom Induktionsstrom hervorgerufenen Magnetfeldes gewechselt hat.

Aufgrund der Polarität des vom Induktionsstrom hervorgerufenen Magnetfeldes kann die Richtung des Stromes in der Leiterschleife bestimmt werden, wie die folgende Abbildung zeigt.



Zusammenfassung :

Die induzierte Spannung lässt einen Strom  $I$  im Ring fließen, dessen Magnetfeld dem erzeugenden Magnetfeld entgegenwirkt. Man sagt auch: das induzierte Magnetfeld ist stets so gerichtet, dass es das erzeugende Magnetfeld zu schwächen versucht.

Für diese Gesetzmäßigkeit gilt folgende Regel:

**Lenzsche Regel: Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, dass er seiner Ursache entgegenwirkt.**

Versuche:

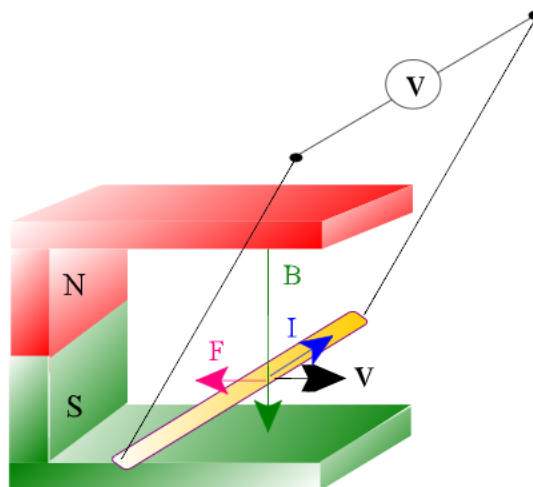
1. Eine Leiterschaukel wird um 10 cm aus der Ruhelage ausgelenkt. Wir beobachten die Schwingungszeit.

Messung:  $t_1$

Die Leiterschaukel pendelt nun im Feld eines Hufeisenmagneten.

Messung:  $t_2$

Der Vergleich der beiden Zeit zeigt:  $t_1 > t_2$

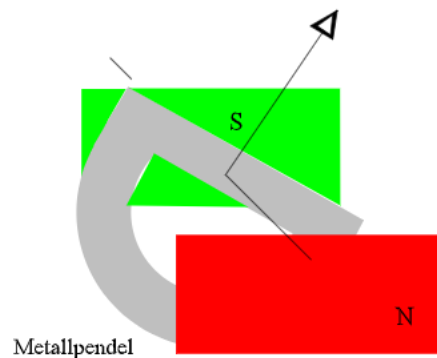


Erklärung :

Bewegt sich die Leiterschaukel im magnetischen Feld, so wird nach dem Induktionsgesetz eine Spannung  $U$  im Leiter induziert. Aufgrund dieser Spannung fließt der Induktionsstrom  $I$ .

Mit der Leiterschaukel bewegen sich die Elektronen im Leiter durch das Magnetfeld. Auf die bewegten Elektronen (den Strom) wirkt eine Lorentz-Kraft senkrecht zur Drahtrichtung. Sie ist der Bewegungsrichtung der Leiterschaukel entgegengesetzt, so dass die Schwingung im Magnetfeld schneller zum Stillstand kommt. Der induzierte Strom wirkt also seiner Ursache entgegen.

2. Ein Metallpendel schwingt zwischen den Polen eines Elektromagneten. Schalten wir den Strom ein, so beobachtet man, dass das Pendel rasch stehen bleibt. Der Grund dafür ist das Auftreten von Wirbelströmen.



Dies wird nach der Lenzschen Regel verständlich, wenn wir uns das Blech in eine Vielzahl geschlossener Leiterschleifen aufgeteilt denken, die sich im Magnetfeld bewegen. In jedem dieser gedachten Stromkreise wird ein Strom induziert. Auf jeden dieser Ströme wirkt (wie bei der Leiterschaukel) die Lorentz-Kraft, die der Bewegung entgegenwirkt. Man spricht auch von einer "Wirbelstrombremse".

Anmerkung:

Bei Messgeräten wird dieser Effekt benutzt, damit der Zeigerausschlag rasch zur Ruhe kommt.

Ist die Bremswirkung infolge der Wirbelströme nicht erwünscht, so müssen die "gedachten Stromkreise" unterbrochen werden. Dies geschieht dadurch, dass ein Blech aus einer Vielzahl geschlitzter Bleche zusammengesetzt wird.

So wird bei Transformatoren kein massiver Eisenkern benutzt. Die Kerne von Transformatoren setzt man vielmehr aus mehreren dünnen, gegeneinander isolierte Bleche zusammen.

Von daher ist das Auftreten von Wirbelströmen in Transformatoren, Generatoren und Elektromotoren nicht erwünscht.

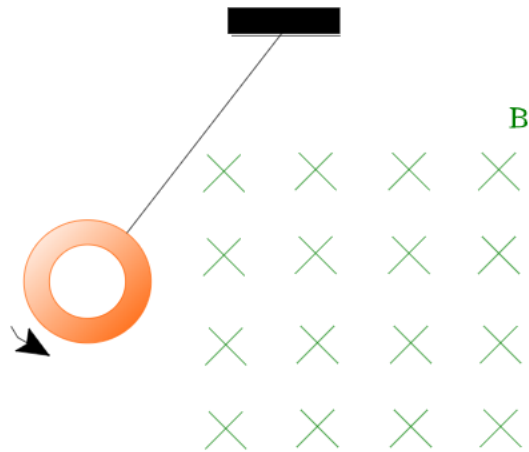
#### Technische Anwendungen der Wirbelströme

- Wirbelstrombremsen
- Induktionshärten metallischer Werkstücke  
Dabei wird das Werkstück durch Induktionsströme zum Glühen gebracht.
- Induktionsherde  
Dabei entsteht die Wärme direkt im Boden der Kochtöpfe. Es sind dabei nur Kochtöpfe geeignet, deren Boden einen Magneten anzieht (Magnettest!).

## Aufgaben zur Lenzschen Regel

### Aufgabe 1: Das Waltenhof-Pendel

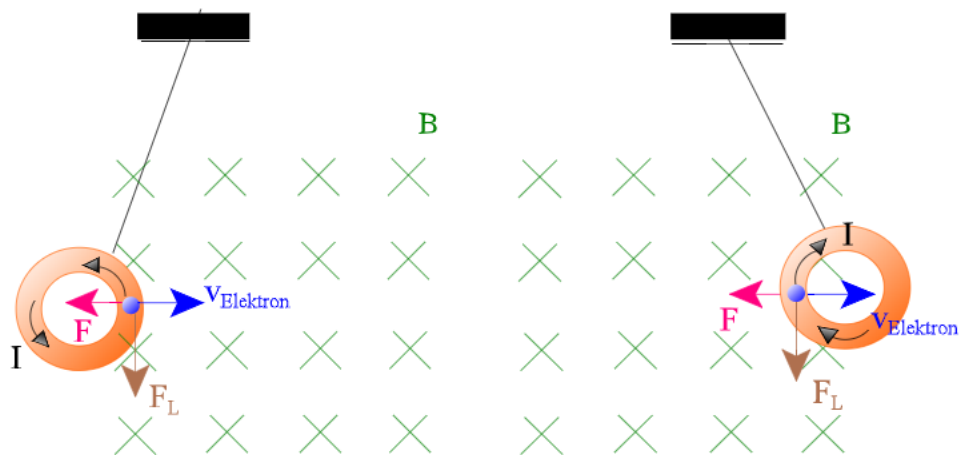
Ein Pendel besteht aus einer langen Stange, an die ein Kupfering befestigt. Man lässt den Ring in das starke Magnetfeld pendeln, das in die Zeichenebene gerichtet ist.



- Welchen Effekt beobachtet man beim Eintritt des Ringes in das Magnetfeld? Begründen Sie ihre Antwort!
- Stützen Sie die Antwort von Teilaufgabe a) indem Sie die Kraft auf ein Elektron im Ring einzeichnen und dann die technische Stromrichtung angeben. Welche Folge hat der Stromfluss im Ring (Wirbelstrom)?
- Was kann man über die auf den Ring wirkenden Kräfte aussagen, wenn dieser sich gerade ganz im Magnetfeld befindet und sich nach rechts bewegt?
- Beschreiben Sie die Vorgänge (ähnlich wie bei Teilaufgabe a und b), wenn der Ring das Magnetfeld auf der rechten Seite wieder verlässt.
- Wo kann man das oben dargestellte Prinzip der Wirbelstrombremse sinnvoll einsetzen?

## Lösungen:

- a.) Der Kupferring wird beim Eintritt in das Magnetfeld abgebremst. Aufgrund der Lenzschen Regel fließt im Kupferring ein Induktionsstrom, der so gerichtet ist, dass er die Ursache seiner Entstehung entgegenwirkt.  
Der stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld erfährt also eine (magnetische) Kraft  $F^*$  nach links, so dass eine Abbremsung erfolgt.
- b.) Die mit dem Leiter nach rechts bewegten Elektronen erfahren eine Lorentzkraft nach unten.  
Der technische Strom fließt also im Ring im Gegenuhrzeigersinn. Da nun ein stromdurchflossener Leiter (Ring) vorliegt, dessen rechter Teil sich im Magnetfeld befindet, wirkt auf ihn eine Kraft  $F$ , deren Richtung nach der rechten Hand-Regel ermittelt werden kann:  
(ZF: Stromfluss nach oben; MF: Magnetfeld in die Zeichenebene; D: Kraft  $F$  auf stromdurchflossenen Leiter).

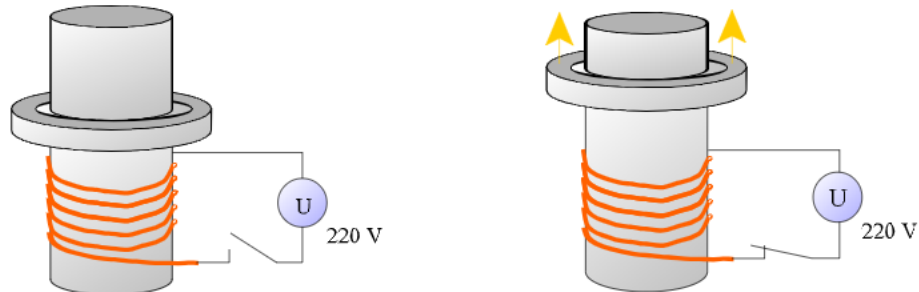


- c.) Wenn der Kupferring ganz in das homogene Magnetfeld eingetaucht ist, erfährt er keine magnetische Kraft mehr. Die Ladungstrennungen in der rechten und linken Seite des Ringes sind so, dass sich die daraus resultierenden Spannungen gegenseitig aufheben. Somit fließt kein Induktionsstrom und damit hat man keine Kraftwirkung.
- d.) Nun befindet sich nur mehr der linke Teil des Rings im Magnetfeld. Es wird wieder ein Strom induziert, der jetzt den Ring im Uhrzeigersinn durchfließt. Aufgrund der Lenzschen Regel muss eine Kraft  $F$  nach links wirken, die den Ring am "Verlassen des Magnetfeldes hindert".
- e.) Lässt man Teile einer rotierenden Metallscheibe, welche auf der Achse eines Motors sitzt durch einen Bereich laufen, in dem man senkrecht zur Scheibenebene ein Magnetfeld einschalten kann, so werden in der Scheibe Ströme (Wirbelströme) induziert, die so gerichtet sind, dass sie die Ursache ihrer Entstehung (Rotation der Scheibe) zu hemmen suchen. Die Rotation der Scheibe und somit auch die Rotation des Motors wird abgebremst ohne dass dabei Materialien (wie bei der Reibungsbremse) abgenützt werden: Wirbelstrombremse.



## Aufgabe 2: "Induktionskanone"

Auf einer Spule mit Eisenkern liegt ein Aluminiumring. Schließt man den Stromkreis, so bewegt sich der Ring nach oben. Verwendet man einen Ring, der durch einen Schlitz unterbrochen ist, so kann keine nach oben gerichtete Bewegung beobachtet werden.



### Lösung:

Wird der Schalter geschlossen, so baut sich in der Spule sehr schnell ein Magnetfeld auf. Ein sich änderndes Magnetfeld erzeugt jedoch nach dem Induktionsgesetz in dem Alu-Ring eine Induktionsspannung, die im Ring einen Strom  $I$  induziert. Nach dem Lenzschen Gesetz ruft dieser Induktionsstrom ein Magnetfeld hervor, das seiner Ursache (Ausbau des magnetischen Feldes in der Spule) entgegenwirkt. Da die beiden magnetischen Felder entgegengesetzte Richtungen aufweisen, wirkt zwischen ihnen eine abstoßende Kraft. Der Ring kann gegen die Schwerkraft nach oben beschleunigt werden.

Ist der Ring durch einen Schlitz unterbrochen, so bedeutet dies eine Unterbrechung eines Stromkreises. Wirbelströme, die zu einem zweiten Magnetfeld führen, können nicht entstehen. Es fehlt eine nach oben gerichtete Kraft, die den Ring anheben kann.

### Hinweis:

Je nach Stärke des Magnetfeldes kann der Ring auf eine erhebliche Geschwindigkeit beschleunigt werden.

## Aufgabe 3: Qualitative Betrachtungen zur "Induktionskanone" (Thomsonscher-Ring-Versuch) (Quelle: [www. Leifi.physik.de](http://www.Leifi.physik.de))

Eine Spule mit 400 Windungen kann an eine Wechselspannungsquelle angeschlossen werden.

- Was passiert mit dem Aluminiumring, der auf dem Eisenkern der Spule sitzt, wenn der Wechselstrom eingeschaltet wird. Erklären Sie diese Erscheinung qualitativ.
- Der Aluminiumring nehme eine Leistung von 1,33 W auf. Der in ihm induzierte Strom ist 140 A. Berechnen Sie den ohmschen Widerstand des Aluminiumrings.
- Der Aluminiumring hat einen Innenradius von 11 mm, einen Außenradius von 13 mm und

eine Höhe von 15 mm. Berechnen Sie hieraus mit den bereits bekannten Daten den spezifischen Widerstand von Aluminium.

- d.) Um die Temperatur des heißen Aluminiumringes zu bestimmen, wird der Ring in ein mit kaltem Wasser gefülltes Kalorimeter getaucht. Welche Größen müssen Sie messen bzw. kennen, damit Sie die Temperatur des heißen Ringes bestimmen können. Geben Sie eine Formel zur Bestimmung der Temperatur aus den bekannten Größen an.

Lösungen:

- a.) In der Spule entsteht durch den Wechselstrom ein magnetisches Wechselfeld. Dieses induziert im Aluminiumring einen Strom, der nach Lenz so gerichtet ist, dass er seine Ursache zu hemmen sucht. Der Strom im Ring wird also stets so fließen, dass das durch ihn bewirkte Magnetfeld stets zu einer Abstoßung des Ringes führt. Auf diese Weise entfernt sich der Ring (wenigstens teilweise) aus dem Spulenwechselfeld, was ja die Ursache seiner Entstehung hemmt.

$$\begin{aligned} b.) \quad R &= \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} \Rightarrow R = \frac{\frac{P}{I_{\text{eff}}}}{I_{\text{eff}}} \Rightarrow \\ R &= \frac{P}{I_{\text{eff}}^2} \Rightarrow R = \frac{P}{I_{\text{eff}}^2} R = \frac{1,33}{140^2} \frac{\text{V} \cdot \text{A}}{\text{A}^2} = 6,79 \cdot 10^{-5} \Omega \end{aligned}$$

- c.) Für die Länge des Leiters gilt:

$$l = 2 \cdot \pi \cdot \frac{r_a + r_i}{2} \Rightarrow l = 2 \cdot \pi \cdot \frac{13 + 11}{2} \text{ mm} = 75,4 \text{ mm} = 0,0754 \text{ m}$$

Für den Querschnitt des Leiters gilt:

$$A = h \cdot (r_a - r_i) \Rightarrow A = 15 \cdot (13 - 11) \text{ mm}^2 = 30 \text{ mm}^2$$

Für den spezifischen Widerstand gilt:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \Rightarrow \rho = \frac{R \cdot A}{l} \Rightarrow \rho = \frac{6,79 \cdot 10^{-5} \cdot 30 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2}{0,0754 \text{ m}} = 0,027 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

- d.) Man taucht den Ring in ein wassergefülltes Kalorimeter. Die Masse des Wassers  $m_w$ , die spezifische Wärmekapazität  $c_w$  des Wassers und die Temperatur  $\vartheta_w$  des kalten Wassers müssen bekannt sein. Außerdem die Dichte  $\rho_{\text{al}}$  von Aluminium und die Mischungstemperatur  $\vartheta_m$  (wenn Ring eine gewisse Zeit im Wasser liegt).

$$\begin{aligned} m_{\text{al}} \cdot c_{\text{al}} \cdot (\vartheta_{\text{al}} - \vartheta_m) &= m_w \cdot c_w \cdot (\vartheta_m - \vartheta_w) \\ \vartheta_{\text{al}} - \vartheta_m &= \frac{m_w \cdot c_w \cdot (\vartheta_m - \vartheta_w)}{m_{\text{al}} \cdot c_{\text{al}}} \Rightarrow \\ \vartheta_{\text{al}} &= \vartheta_m + \frac{m_w \cdot c_w \cdot (\vartheta_m - \vartheta_w)}{l \cdot A \cdot \rho_{\text{al}} \cdot c_{\text{al}}} \end{aligned}$$