

## BESCHREIBUNG

### Vorrichtung und Verfahren zur Thermalkompensation eines Waffenrohres

Die Erfindung betrifft ein Geschützrohr einer Waffe, beispielsweise einer Revolverkanone zum Einsatz in der land- oder seegestützten Flugabwehr. Insbesondere betrifft diese Erfindung ein in einer Rohrwiege und einer Rohrabstützung gelagertes Geschützrohr, wobei die Rohrwiege zur Stabilisierung, Führung und Schwingungsdämpfung in eine Rohrabstützung fortgeführt wird, die das Rohr an mehreren Stellen trägt bzw. abstützt.

Ein Geschütz umfasst in der Regel eine Unterlafette, einen Turm und eine Rohrwiege mit Rohrabstützung, in der das Rohr gelagert ist (EP 1 154 219 A). Bei Sonneneinstrahlung ist die obere Seite der Rohrwiege einer grösseren Temperaturerhöhung ausgesetzt, wohingegen die nicht der Sonneneinstrahlung ausgesetzte untere Seite nur eine geringere Temperaturerhöhung erfährt. Die sich ergebende Thermaldifferenz führt zu einer unterschiedlichen thermalen Ausdehnung zwischen der oberen und der unteren Seite der Rohrwiege, sodass als Resultat ein Rohr mit einer gewissen Länge  $l$  sich um einen gewissen Winkel  $\delta$  an seinem freien Ende aus der ursprünglichen Rohrachse heraus nach unten ausgelenkt wird. Diese Auslenkung hängt stark von den Umgebungs- und Witterungseinflüssen ab und beeinflusst wiederum signifikant die Treffwahrscheinlichkeit der Waffe.

Derartige thermale Unterschiede können auch seitlich auftreten – etwa wenn die Waffe zum Sonnenaufgang oder Sonnenuntergang primär von der Seite Sonnenstrahlung erfährt oder auch durch Wind, der die windzugewandte Geschützseite stärker kühlt als die windabgewandte Seite. Während eines realen Einsatzes werden derartige Effekte in Kombination auftreten.

Bei jedem Schuss wird das Rohr durch die Explosionsgase beansprucht und gleichzeitig wird durch die mechanische Reibung zwischen Rohr und Projektil Reibungswärme erzeugt. Dies führt zu einer Temperaturerhöhung des Rohrs. Dies ist insbesondere der Fall, wenn die Waffe im Serienfeuer verwendet wird. Dann wird die Wärme am Verschlussende der Waffe und auf der Rohroberseite – wohin die Wärme durch Konvektion übertragen wird – konzentriert. Auch dieser schussbedingte Temperaturgradient führt zu einer Auslenkung des freien Roh-

rendes aus der Sollposition heraus.

Einfache passive Lösungen verwenden nach der Lehre der DE 30 05 117 eine direkt auf das Rohr aufgesetzte Schutzhülle, wobei die Schutzhülle nach der weitergehenden Lehre der DE 199 04 417 nicht radialsymmetrisch ausgeführt ist, um asymmetrischer Erwärmung entgegenzuwirken.

Die DE 1918 422 offenbart eine Wärmeschutzhülle aus einer das Kanonenrohr in geringem Abstand umgebenden Metallhülle, wobei als Wärmeisolation die ruhende Luftschicht zwischen dem Geschützrohr und der Metallhülle fungiert. Diese Lösungen sind statisch und können nicht auf veränderliche Umgebungsbedingungen reagieren.

Doppelwandige Geschützhüllen führen nach der Lehre der WO 97 / 47 939 bzw. der US 4,753,154 ein Arbeitsfluid zwischen den beiden Hüllenflächen entlang, um die Wärmeabfuhr aus dem Schuss zu verbessern. Auch diese Systeme arbeiten ungeregelt und rein passiv.

Aktive Heizelemente direkt auf dem Waffenrohr aufgebracht offenbaren die DE 32 19 124 sowie GB 2,328,498. Die Heizstreifen parallel zur Rohrachse überkompensieren äussere Temperatureffekte, indem sie das Rohr auf eine Temperatur heizen, die etwa 10°C über der mittleren Umgebungstemperatur liegt. Die Auslenkung des Rohrs aus der Normlage wird beispielsweise über optische Methoden ermittelt. Damit ist dieses Verfahren sehr energieaufwändig und gleichzeitig sehr träge, die optischen Methoden sind anfällig gegenüber der mechanischen Systembelastung bei der Schussabgabe.

Den schussbedingten Temperaturanstieg misst nach DE 44 33 627 ein Thermoelement, welches in die Wand des Ladungsraumes per Sackbohrung eingebracht wird. Zum einen wird die mechanische Stabilität durch die Bohrung beeinträchtigt, zum anderen kann kein Temperaturgradient über die Rohrlänge aufgenommen werden.

Der japanische Abstract JP 7-91891 offenbart eine aktive Vermessung der Rohrdurchbiegung mittels optischer Systeme und gleichzeitig eine Kompensation der Rohrbiegung über einen an beiden Enden des Waffenrohrs wirkenden Hydraulikzylinder. Dieses Verfahren ist sehr aufwändig. Darüber hinaus kann eine Kompensation nur in der Ebene stattfinden, die durch die Rohrachse und die Mittelachse des Hydraulikzylinders gebildet wird. Daher ist keine allgemeine Kompensation in Azimut und Elevation möglich.

Es ist Aufgabe der Erfindung, eine Vorrichtung und ein Verfahren bereitzustellen, mittels derer eine einfache und sehr kostengünstige Kompensation einer thermisch induzierten Rohrverbiegung auch während der Schussabgabe möglich ist.

Gelöst wird die Aufgabe durch die Merkmale des Patentanspruchs 1 in Hinblick auf die Vorrichtung und Patentanspruch 6 in Hinblick auf das Verfahren. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind in den Unteransprüchen aufgezeigt.

Bekanntlich neigt sich das Waffenrohr bei Sonneneinstrahlung nach unten. Diese Deformation wird durch Temperaturunterschiede zwischen der oberen und unteren Seite der Rohrabstützung und der Wiege verursacht. - Der Effekt der Rohrabstützung und der Effekt der Wiege können grundsätzlich als separate Probleme betrachtet werden; sollten jedoch zur Ermittlung der totalen Rohrneigung superponiert werden.

Der Erfindung liegt daher die Idee zugrunde, Temperatursensoren einzusetzen und somit ein System zur Temperaturkorrelation zu schaffen. Das System ist dabei technisch in der Lage, Ermittlung der Temperaturdifferenzen zwischen der oberen und unteren Seite der Rohrabstützung (der gegenüberliegenden Sensoren) zu ermitteln sowie zwischen der rechten und linken Seite der Rohrabstützung (der gegenüberliegenden Sensoren). Die Berechnung der Rohrneigung wird mittels der Temperaturdifferenzen durchgeführt. Die Kompensierung der Rohrneigung erfolgt dann über den Inklinationswert, wobei die Kompensierung durch Änderung der Ausrichtung der Rohres in Azimut und / oder Elevation erfolgt. Gleichzeitig kann eine Überwachung der Temperatursensoren und der Databox eingebunden werden.

Die Temperaturkompensationsfunktion wird als zusätzlicher Parameter in die Waffensteuerung und insbesondere in die Berechnung von Azimut und Elevation der Waffe verwendet. Damit kann eine temperaturbedingte Rohrauslenkung direkt durch die Servomotoren der Waffe kompensiert werden. Damit ist das erfindungsgemässe Verfahren sehr schnell; es regelt mit der üblichen Geschwindigkeit von bis zu mehreren  $10^\circ$  pro Sekunde.

Gleichzeitig kann das Verfahren während des Schiessens eingesetzt werden. Es ist nicht notwendig, die Waffe aus dem schiessbereiten Zustand in einen nicht schiessbereiten Wartungszustand zu versetzen, um die Rohrkompensation vorzunehmen. Damit erhöht sich die Einsatzdauer der Waffe.

Für die erfindungsgemässe Vorrichtung sind nur wenige technische Modifikationen vorzunehmen. Im Wesentlichen genügt auf der Hardwareseite die Installation bekannter Temperaturfühler sowie deren Verbindung mit der Databox. Damit ist die Vorrichtung sehr kostengünstig.

Die Rohrkompensation induziert keine neuen Biegemomente oder Spannungen im Rohr. Damit erhöht sich die Lebensdauer der Waffe.

Der Ausfall einzelner Sensoren kann über ein mathematisches Modell kompensiert werden, da von einer stetigen Temperaturverteilung in der Rohrwiege und Rohrabstützung ausgegangen werden kann (Plausibilitätscheck). Der Auswertalgorithmus enthält aber diverse Rückfallebenen für den Fall, dass mehrere Sensoren ausfallen. Damit ist das System besonders stabil gegenüber dem Ausfall einzelner Sensordaten.

In Weiterführung der Erfindung wird der zeitliche Verlauf der Temperaturkorrelationsfunktion

aufgezeichnet und wird für spätere Wartungsarbeiten auslesbar im Geschützrechner gespeichert. Dadurch kann die thermische Belastung des Geschützes im Nachhinein protokolliert werden oder Fehler im Berechnungsalgorithmus können aufgedeckt werden.

Entsprechend den militärisch üblichen Temperaturbereichen sind die Sensoren und die Databox für eine funktionstüchtige Arbeitsweise ausgelegt, üblicherweise von  $-46^{\circ}\text{C}$  bis  $+120^{\circ}\text{C}$ . In diesem Temperaturbereich werden die Messungen mit einer ausreichend hohen Auflösung und Genauigkeit durchgeführt. Auflösung und Genauigkeit ergeben sich aus dem verwendeten mathematischen Modell, eine Auflösung von  $0.1^{\circ}\text{C}$  und eine Genauigkeit von  $0.2^{\circ}\text{C}$  haben sich in der Praxis als ausreichend erwiesen.

Die vorliegende Idee zeichnet sich somit aus durch:

- sehr einfache Messmethode mit herkömmlichen Temperaturfühlern; das System ist kostengünstig und stabil
- Redundanzen in den Fühlern bei grosser Ausfallsicherheit des Systems gegenüber dem Ausfall einzelner Messfühler
- sehr schnelle Kompensation der Rohrdeformation über Geschützantriebe
- Einsatz während des Schiessens möglich, auch bei Serienfeuer
- Kompensation von Azimutfehlern genauso wie von Elevationsfehlern aufgrund der thermisch induzierten Rohrdeformation
- keine mechanische Beeinträchtigung des Rohrs bzw. der Rohrlagerung durch Messmittel.

Anhand eines Ausführungsbeispiels mit Zeichnung soll die Erfindung näher erläutert werden. Es zeigt:

- Fig. 1            einen Geschützturm nach dem Stand der Technik,  
Fig. 2            den Geschütztrum mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung in der Rohrwiege und der Rohrabstützung,  
Fig. 3            eine vereinfachte Darstellung der Anordnung der Sensoren aus Fig. 2,  
Fig. 4            eine Blockbilddarstellung des Verfahrens.

Fig. 1 zeigt ein herkömmliches Revolvergeschütz 10 mit einem Geschützturm 1, einer Unterlafette 2, einer Rohrwiege 3 sowie als Verlängerung der Rohrwiege 3 eine Rohrabstützung 4. Die Rohrabstützung 4 besteht im Wesentlichen aus einem Gitterrohrrahmen (nicht näher dargestellt) und kann, wie das gesamte Geschütz 10 mit einer Schutzhülle (nicht näher dargestellt) verkleidet sein.

Nach Fig. 2 wird ein derartiges Geschütz 10 mit mehreren Temperatursensoren p1- pn, bevorzugt wird eine Anzahl von 16, im Bereich der Rohrwiege 3 und Rohrabstützung 4 versehen. Mittels der 16 Sensoren (p1-p16) wird bei der Rohrabstützung 4 (zwölf Sensoren) und bei den Wiegenwänden 3 (vier Sensoren) die Temperatur gemessen. Steckerboxen 5 fassen die Signale der Temperatursensoren p1 –p16 aus Rohrabstützung 4 und Wiege 3 zusammen und übertragen diese per Datenverbindungen 6 zur Databox 7, worin die die analogen Signale der Temperatursensoren digitalisiert werden. Anschliessend sendet die Databox 7 die Daten über den Ethernetlink 8 zur GCU 9 (DVS). Die GCU kompensiert dann die Deformation mittels eines Offsets zum Horizont (Inklinationswert-Anpassung). Die Databox 7 umfasst einen Analog/Digitalwandler und einen Server mit Ethernet.

Die Anordnung der Sensoren in Rohrwiege und Rohrabstützung sowie die Verbindung der Komponenten wird nachfolgend beschrieben. - Ausgehend von Fig. 3. werden im Wesentlichen senkrecht zur Rohrachse vier Ebenen definiert, wobei eine Ebene E4 bevorzugt in der Rohrwiege und drei Ebenen E1-E3 bevorzugt in der Rohrabstützung liegen. Die Ebenen tragen jeweils vier grundsätzlich aus dem Stand der Technik bekannte Temperatursensoren (z.B. PT 100), welche vorzugsweise im Bereich der Ecken der Ebenen angeordnet sind. Die erste Ebene E1 in der Nähe der Rohrmündung trägt die vier Sensoren p1-p4, die nächste Ebene in Richtung Rohrwiege E2 trägt die Sensoren p5-p8 usw. Die Sensoren sind über Datenleitungen 6 mit der Databox 7 verbunden. Die Databox 7 digitalisiert die analogen Signale der Temperatursensoren und sendet die Temperaturdaten über einen Datalink 8 zur GCU 9. Mit Hilfe dieser Anordnung ist es möglich, die Temperaturverteilung an Rohrwiege 3 und Rohrabstützung 4 zu messen.

Die Werte der Temperaturmessfühler p1-p16 werden digitalisiert und an die Datenverarbeitungseinrichtung (GCU 9) übertragen. Gleichzeitig werden sie mit den jeweiligen Ablagewerten des Rohrs 11 verglichen. Für die temperaturinduzierte Rohrauslenkung wurde ein mathematisches Modell erarbeitet, welches mit Optimierungsparametern den Zusammenhang zwischen den Temperaturwerten der Messfühler p1-p16 und der Gesamt-Rohrauslenkung herstellt.

Der Ablauf des erfindungsgemässen Verfahrens ist zusammengefasst in Fig. 4 dargestellt. Für den Fachmann ist aus dem darin dargestellten allgemeinen Algorithmus ohne weitere Anstrengung ersichtlich, wie die Kompensation des Azimut-Fehlers bzw. einer Mischform dieser beiden ausgestaltet sein müsste, sodass auf eine explizite Angabe hier verzichtet werden kann. Die Erfindung bezieht sich in gleicher Weise auf die Kompensation des Azimut-Fehlers. - Die numerischen Gewichtsparemeter a, b, g werden vorab entweder in das System (GCU) eingegeben oder beim Vermessen und Einrichtung des Geschützes 10 bestimmt und in das mathematische Modell übernommen.-

Die Temperaturwerte werden polynomisiert, um eine Längenbetrachtung für die Abbildung des Rohrfehlers zu erhalten. Die GCU 9 erhält von der Databox 7 Temperaturwerte T mit jeweils einem Index für den betreffenden Sensor. Damit werden gemittelten Temperaturdifferenzen in Elevation von jeder Sensorebene E1 bis E4 der Rohrabstützung und der Wiege ermittelt. Parallel dazu wird ermittelt, ob und wie viele der Sensoren funktionstüchtig sind und plausible Werte liefern.

Von

$$T_{E1\_Diff\_El} = \frac{(T_{E1\_oben\_rechts} + T_{E1\_oben\_links})}{N_{E1\_Anzahl\_korrekte\_obere\_Sensoren}} - \frac{(T_{E1\_unten\_rechts} + T_{E1\_unten\_links})}{N_{E1\_Anzahl\_korrekte\_untere\_Sensoren}} [^{\circ}\text{C}]$$

bis

$$T_{E4\_Diff\_El} = \frac{(T_{E4\_oben\_rechts} + T_{E4\_oben\_links})}{N_{E4\_Anzahl\_korrekte\_obere\_Sensoren}} - \frac{(T_{E4\_unten\_rechts} + T_{E4\_unten\_links})}{N_{E4\_Anzahl\_korrekte\_untere\_Sensoren}} [^{\circ}\text{C}]$$

ergeben sich die Temperaturdifferenzen in den Ebenen E1 bis E4. Die Rohrneigung V für jede Sensorebene ergibt sich aus der Anwendung der folgenden Korrelation, wobei die a und b numerische Anpassungsparameter sind. Es ergeben sich:

von

$$V_{E1\_Rohr\_P\_El} = a_{R\_El} \cdot T_{E1\_Diff\_El} + b_{R\_El} [\text{rad}]$$

bis

$$V_{E3\_Rohr\_P\_El} = a_{R\_El} \cdot T_{E3\_Diff\_El} + b_{R\_El} [\text{rad}]$$

und

$$V_{E4\_Rohr\_P\_El} = a_{W\_El} \cdot T_{E4\_diff\_El} + b_{W\_El} [\text{rad}]$$

Anschliessend wird die ermittelte gesamte Rohrneigung für jede Sensor-Ebene E1- E4 gewichtet. Dadurch wird die Plausibilitätsüberwachung vereinfacht und um die Modularität zur Berechnung der gesamten Rohrneigung (falls eine Sensor-Ebene ausfällt) zu gewährleistet. Es ergibt sich:

$$V_{Rohr\_R\_P\_El} = V_{E1\_Rohr\_P\_El} \cdot g_{1\_El} + V_{E2\_Rohr\_P\_El} \cdot g_{2\_El} + V_{E3\_Rohr\_P\_El} \cdot g_{3\_El} [\text{rad}]$$

und

$$V_{Rohr\_W\_P\_El} = V_{E4\_Rohr\_P\_El} \cdot g_{4\_El} [\text{rad}]$$

mit den numerisch anzupassenden Wichtungsparemtern g.

In einer weiteren Ausführungsform wird zusätzlich die inhärente Trägheit des Systems berücksichtigt. Diese entsteht dadurch, dass die Messfühler p1-p16 wesentlich schneller Temperaturänderungen anzeigen können, als sich dieser Gradient in Rohr 11 und Rohrabstützung 4 bzw. Rohrwiege 3 ausgleichen kann. Zur Berücksichtigung des zeitlichen Messverzuges wird ein sog. D-Anteil zur Steuerung addiert. Dieser setzt sich zusammen aus der ersten numerischen Ableitung der zuvor genannten P-Anteile der Rohrabstützung 4 und der Wiege 3.

$$\frac{\Delta V_{Rohr\_R\_P\_El}}{\Delta t} = \frac{(V_{Rohr\_R\_P\_El}(t_n) - V_{Rohr\_R\_P\_El}(t_{n-1}))}{t_n - t_{n-1}} \quad [\text{rad/min}]$$

und

$$\frac{\Delta V_{Rohr\_W\_P\_El}}{\Delta t} = \frac{(V_{Rohr\_W\_P\_El}(t_n) - V_{Rohr\_W\_P\_El}(t_{n-1}))}{t_n - t_{n-1}} \quad [\text{rad/min}]$$

Dieser wird mit den D-Parametern multipliziert.

$$V_{Rohr\_R\_D\_El} = \frac{\Delta V_{Rohr\_R\_P\_El}}{\Delta t} \cdot D_{R\_El} \quad [\text{rad}]$$

und

$$V_{Rohr\_W\_D\_El} = \frac{\Delta V_{Rohr\_W\_P\_El}}{\Delta t} \cdot D_{W\_El} \quad [\text{rad}]$$

wobei die D-Parameter wiederum numerische Fit-Parameter sind. Die gesamte Rohrneigung ermittelt sich aus der Summe der P-Anteile und D-Anteile der Rohrabstützung und der Wiege.

$$V_{Rohr\_El} = V_{Rohr\_R\_P\_El} + V_{Rohr\_W\_P\_El} + V_{Rohr\_R\_D\_El} + V_{Rohr\_W\_D\_El} \quad [\text{rad}]$$

## PATENTANSPRÜCHE

1. Vorrichtung zur Thermalkompensation eines Waffenrohres (11) eines Geschützes (10) mit wenigstens einem Waffenrohr (11), das in einer Rohrwiege (3) sowie als Verlängerung der Rohrwiege (3) in einer Rohrabstützung (4) gelagert ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass mehrere Temperatursensoren (p1-p16) an der Rohrwiege (3) und der Rohrabstützung (4) eingebunden sind, die über Datenleitungen (6) mit einer Databox (7) und die Databox (7) mit einer Datenverarbeitungseinrichtung (9) verbunden sind, wobei die Datenverarbeitungseinrichtung (9) eine Rohrneigung mittels Temperaturdifferenzen berechnet und zur Thermalkompensation auf Aktuatoren zur Änderung der Ausrichtung des Waffenrohres (11) einwirken kann.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass bevorzugt 16 Temperatursensoren (p1-p16) eingebunden sind, wobei Variationen in der Anzahl möglich sind.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass im Wesentlichen senkrecht zur Rohrachse bevorzugt vier Ebenen (e1-E4) definiert werden, wobei vorzugsweise eine Ebene (E4) in der Rohrwiege (3) und vorzugsweise drei Ebenen (E1-E3) in der Rohrabstützung (4) liegen.
4. Vorrichtung nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Temperatursensoren (p1-p16) vorzugsweise im Bereich der Ecken der Ebenen (E1-E4) angeordnet sind.
5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Rohrabstützung (4) gestellartig ist.
6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Aktuatoren geschützeigene Stellmotore sind, mit denen das Waffenrohr (1) in Azimut und / oder Elevation ausrichtbar ist.
7. Verfahren zur Thermalkompensation eines Waffenrohres (11) eines Geschützes (10) mit wenigstens einem Waffenrohr (11), das in einer Rohrwiege (3) sowie als Verlängerung der Rohrwiege (3) in einer Rohrabstützung (4) gelagert ist, mit den Schritten:
  - Messen der Temperatur mittels Temperatursensoren (p1-p16) an der Rohrwiege (3) sowie der Rohrabstützung (4),

- Ermitteln der Temperaturdifferenz zwischen der oberen und unteren Seite und der rechten und linken Seite der Rohrwiege (3) als auch der Rohrabstützung (4),
  - Berechnung der Rohrneigung mittels der ermittelten Temperaturdifferenzen,
  - Kompensierung der Rohrneigung durch Änderung der Ausrichtung des Waffenrohres (11).
8. Verfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass Temperaturdifferenzen von jeder Sensorebene (E1 bis E4) der Rohrabstützung (4) und der Rohrwiege (3) in Elevation und / oder Azimut ermittelt werden.
9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die temperaturbedingte Rohrauslenkung direkt durch Aktuatoren, wie geschützeigene Servomotoren der Waffe, kompensiert werden.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Ausfall einzelner Temperatursensoren (p1-p16) über ein mathematisches Modell kompensiert wird.
11. Verfahren nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Auswertalgorithmus diverse Rückfallebenen für den Fall enthält, dass mehrere Temperatursensoren (p1-p16) ausfallen.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass auch die inhärente Trägheit des Systems berücksichtigt wird.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass zeitliche Verläufe der Temperaturkorrelationsfunktion aufgezeichnet werden.
14. Verfahren nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass der / die zeitliche(n) Verlauf / Verläufe für spätere Wartungsarbeiten auch auslesbar im Geschützrechner gespeichert werden.