

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 91 (1973)
Heft: 30: SIA-Heft, Nr. 7/1973

Artikel: Zur Entwicklung der Ablationswerkstoffe
Autor: Spincourt, Jacques
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-71946>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 19.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Für die besondere Konfiguration des vorliegenden Beispiels, dessen Abfluggewicht bei der Grossausführung etwa 55 t beträgt, ist dieses Modellabfluggewicht noch um etwa 6 bis 8 kg zu hoch. Die Gewichtsabschätzung liegt jedoch besonders bezüglich der Werkstoffwahl sowie der Produktauswahl einiger Bauteile auf der sichereren Seite, so dass die erforderliche Gewichtsverminderung durch Optimierung erwartet werden kann. Eine andere Möglichkeit der Gewichtsanpassung besteht in der Erhöhung des zulässigen Modellgewichts durch Vergrössern des Massstabsfaktors, was jedoch nur im Rahmen der Schubreserve des gewählten Antriebssystems als sinnvoll betrachtet werden kann.

Schlussbemerkung

Im ersten Teil der Ausführungen wurde die Grundidee der Technik freifliegender Modelle dargelegt, deren Zweckmässigkeit anhand von Vergleichen mit bisher praktizierten Verfahren untersucht sowie Einsatzmöglichkeiten erörtert. Der vorliegende Teil der Ausführungen befasst sich mit der Durchführbarkeit dieser Methode im einzelnen. Diese Aus-

führungen lassen erkennen, dass die Methode freifliegender, dynamisch ähnlicher Modelle zur umfassenden Untersuchung komplexer Probleme des Transitionsfluges von VTOL- und STOL-Konfigurationen sinnvoll und durchführbar ist.

Literaturverzeichnis

- [6] Wilson, Michael: Towards the Intercity Era, «Flight International», 27. November 1969.
- [7] Konecny, Jan: Berechnung und Konstruktion von Gasführungssystemen. Berichte TB TEW/Ae ZTL 69/19 ff. der Firma Hamburger Flugzeugbau GmbH.
- [8] Studer, Hans-Luzi, E. Petri und K. Wurmstedt: Luftfahrzeug mit waagerecht und ortsfest angeordneten Schub- und Hubgebläsen. Deutsche Offenlegungsschrift 2013 344.
- [9] Berichte TB TV/F V/STOL 67-1 und TB TV/F ZTL 68-15 der Firma Hamburger Flugzeugbau GmbH.

Adresse des Verfassers: Dipl.-Ing. Jürg Dieter Studer, D-2091 Winsen/Luhe, Königstrasse 245, i. Fa. Messerschmitt Bölkow Blohm, Unternehmungsbereich Hamburger Flugzeugbau, D-2103 Hamburg 95, Kreetslag 10.

Zur Entwicklung der Ablationswerkstoffe

DK 620.22 : 629.10

Von Jacques Spincourt, Paris¹⁾

Beim Wiedereintritt von Weltraumkapseln und Flugkörperköpfen in die Atmosphäre und auch an den Düsen von Raketenmotoren entstehen während verhältnismässig langer Zeiträume sehr hohe Wärmeflüsse, die absorbiert werden müssen. Hierbei haben sich die klassischen Kühlverfahren mittels Wärmesenken, Konvektionskühlung oder Wärmeabstrahlung oft als unzureichend erwiesen, so dass ein neues Verfahren entwickelt werden musste, das als Ablationskühlung bezeichnet wird.

Die Ablationskühlung beruht auf zwei bekannten, bei der Wärmeabsorption auftretenden Erscheinungen: Veränderungen physikalischer Art (Schmelzen, Verdampfen, Sublimieren) und bestimmte chemische endotherme Zerfallsreaktionen des Werkstoffes. Für die Ablationskühlung sind also Werkstoffe zu wählen, in denen diese Merkmale kombiniert sind, und zwar möglichst im Verein mit den Auswirkungen der Wärmequelle und der Wärmeabstrahlung.

Seit mehr als zehn Jahren befasst sich die Forschung mit den Ablationswerkstoffen und hat im Laufe dieser Zeit eine Anzahl von Eigenschaften definiert, die zum optimalen Wärmedschutz erforderlich sind. Vereinfacht gesagt, wirkt die Ablationskühlung folgendermassen: Der Werkstoff zerfällt bei der Ablationstemperatur T_{ab} an der Oberfläche, welche infolgedessen kontinuierlich zurückweicht. Ein Teil des auftreffenden Wärmeflusses, dessen Grösse vom Abstrahlkoeffizienten der Oberfläche, von der Menge der Ausgasung beim Ablationsvorgang und der bei den physikalisch-chemischen Umwandlungssprozessen entstehenden Wärme abhängt, wird nach aussen abgestrahlt, während der verbleibende Teil in die Schutzverkleidung eindringt. Es ist demnach erforderlich, dass der Ablationswerkstoff bei seiner Vernichtung ein Höchstmaß an Wärme aufzehrt, zudem muss er die zu schützende Wand bei der Temperatur T_{ab} isolieren; ferner ist beim Ablationsvorgang so wenig Masse wie möglich zu verbrauchen. Ein Ablationswerkstoff sollte also einerseits durch die Ablation möglichst viel Wärme ableiten, anderseits aber eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit besitzen. Da diese beiden Bedin-

gungen im allgemeinen unvereinbar sind, wird bei der Wahl eines Ablationswerkstoffes letztlich immer ein Kompromiss geschlossen, welcher vor allem den beabsichtigten Einsatzzweck, das heisst die Höhe der bei dem Einsatz zu erwartenden Wärmeflüsse berücksichtigt.

Vergleich einiger Ablationswerkstoffe

Bei den Ablationswerkstoffen handelt es sich im allgemeinen um Verbundwerkstoffe aus Verstärkungsfasern und einem Bindemittel. Als Bindemittel werden bevorzugt Phenol- oder Silikonharze, aber zuweilen auch Epoxydharze und Polyurethane verwendet. Phenolharze bieten den Vorteil, dass sie beim Zerfall einen höheren Prozentsatz an Kohlenstoff(Koks) mitführen, während die Epoxydharze dazu neigen, vor dem Verkohlen ihr Volumen zu vergrössern, wodurch die Ablationsschicht dicker und die Ablationsgeschwindigkeit herabgesetzt wird.

Die Armierungsfasern sollen die Abriebfestigkeit erhöhen und das Abreissen des Ablationswerkstoffes verhindern; am gebräuchlichsten sind Siliziumdioxid-, Asbest- und Kohlenstofffasern. Erstere hinterlassen nach dem Zerfall des Werkstoffes einen festen Rückstand, ihr Schmelzpunkt liegt höher als 1800 °C, und ihre Wärmeleitfähigkeit ist gering. In der Praxis werden diese Fasern in Form von Matten verwendet, wobei die Schichten der Matte senkrecht zur zu schützenden Wand angebracht werden. Unter den Ablationswerkstoffen mit Siliziumdioxidsfasern sind Orthostrasil und Renard zu nennen, welche als Bindemittel ein Phenolharz verwenden. Orthostrasil hat eine Ablationstemperatur von 2570 K und eine Ablationswärmeleistung von 1700 kJ/kg und wird mit seinem spezifischen mittleren Gewicht von 1,6 t/m³ vor allem zur Verkleidung von Düsen und Wiedereintrittskörpern verwendet. Nach der endgültigen Formgebung wird es im allgemeinen auf die darunterliegenden Konstruktionselemente geklebt. Renard weist dasselbe spezifische Gewicht auf bei einer Ablationstemperatur von 2370 K und einer Wärmeablationsleistung von 1000 kJ/kg. Dieses Material passt sich besser als Orthostrasil an stark gewölbte Flächen wie Flugkörperköpfe an.

Kohlenstofffasern werden für Werkstoffe verwendet, die sehr starke Wärmeflüsse absorbieren müssen; der Sublimationsvorgang tritt bei mehr als 3500 °C ein, und die Wärme-

¹⁾ Erschienen in «Interavia, Internationale Revue für Luftfahrt, Raumfahrt und Elektronik» 28 (1973), H. 3, S. 260; abgedruckt mit freundlicher Genehmigung der Redaktion.

leitfähigkeit ist gering. Ihr Hauptnachteil liegt in ihrem schlechten Verhalten in oxydierender Umwelt, weshalb sich ihr Hauptanwendungsgebiet bei den Raketenmotoren befindet, wo sie vor allem an den Düsenhälsen angebracht werden. In dieser Kategorie wäre der Werkstoff Astrakan zu nennen, der zu 59% aus Kohlenstofffasern, 38,5% Phenolharzen und Elastomeren besteht und dessen Ablationswärmefestigkeit mit 11000 kJ/kg wesentlich höher liegt als bei den bisher genannten Marken, während die Ablationstemperatur mit 2750 K den vorgenannten Werten vergleichbar ist. Um den Oxydationswiderstand der Kohlenstofffasern zu erhöhen, laufen zur Zeit Untersuchungen über die Anwendung von pyrolytischen Graphitfasern.

Ferner können zur Armierung Bor/Nitrit-, Zirkon- und Nylonfasern verwendet werden. Letztere ergeben einen sehr leichten Werkstoff mit hoher Ablationswärmefestigkeit, jedoch gibt sich beim Zerfallsprozess des Nylons ein fest am darunterliegenden intakten Werkstoff haftender Koksbefüllung, der ziemlich starke Schwankungen in der Wandtemperatur verursachen kann.

Zulassungsversuche

Die Herstellung von Ablationswerkstoffen läuft in mehreren Phasen ab, die von oft nicht leicht reproduzierbaren Parametern abhängig sind. Es ist also nötig, die Erzeugnisse im Versuch auf ihre Qualität, besonders bezüglich der mecha-

nischen und thermischen Eigenschaften, zu überprüfen. Zu den mechanischen Versuchen gehören die Messung der Zug-, Kompressions- und Scherfestigkeit sowie Zugversuche bis zum Bruch.

Bei den thermischen Versuchen werden die spezifische Wärme, die Wärmeleitfähigkeit und der Ausdehnungskoeffizient gemessen, wobei die letzteren Parameter stark von der Ausrichtung der Fasern abhängen. Zur Ergänzung dieser Versuche werden die Werkstoffe noch starken Erhitzungen mittels Azetylen-Sauerstoff-Gebläse oder Plasmastrahl unterworfen. Mit dem Plasmastrahl werden starke Wärmeflüsse erreicht, mit denen sich das Verhalten des Werkstoffes bei der Ablation überprüfen lässt – beispielsweise lässt sich der Zeitraum ermitteln, in dem eine Schicht von bestimmter Dicke vernichtet wird, oder der Temperaturverlauf in verschiedenen Tiefen im Verhältnis zur Zeit.

Schliesslich kann auf alle diese Versuche noch ein Versuch unter Einsatzbedingungen folgen. Dies gilt vor allem für die Schutzverkleidungen der Düsen von Raketenmotoren, welche in Probeläufen an den Düsen selbst erprobt werden.

Abschliessend wäre zu bemerken, dass die Ablationskühlung in der Praxis zwar bereits erstaunliche Ergebnisse erzielt hat, die Forschung auf dem Gebiet der Grundbestandteile und vor allem der Verstärkungsfasern aber so intensiv betrieben werden, dass in der Zukunft noch merkliche Fortschritte zu erwarten sind.

Mikrowellen identifizieren Eisenbahnwagen

DK 625.2:62-777:621.3.029.6

Auf dem Gleisnetz der Deutschen Bundesbahn fahren oder stehen etwa 320000 Güter- und rund 20000 Personenzüge; in ganz Europa sind es knapp zwei Millionen. Damit der einzelne Waggon in diesem umfangreichen Wagenpark leichter zu verfolgen ist, haben die europäischen Eisenbahngesellschaften bereits vor Jahren einheitliche Bezeichnungen mit zwölfstelligen Nummern eingeführt. Diese Fahrzeugnummern, die jeder Waggon auf dem sogenannten Wagenzettel mit sich führt, muss aber z.B. im Güterzugbetrieb das Rangierpersonal noch selbst ablesen und schriftlich oder per Sprechfunk an das Stellwerk weitermelden. Da dieses Verfahren sehr zeitraubend und personalintensiv ist, haben sich die europäischen Eisenbahngesellschaften entschlossen, ein einheitliches Identifizierungssystem für das automatische Lesen und Melden von Fahrzeugnummern einzuführen. Nach umfangreichen Untersuchungen in den letzten Jahren kamen zwei Systeme in die engere Wahl: ein optisches einer amerikanischen Firma und ein mit Mikrowellen arbeitendes aus Deutschland.

Arbeitsweise

Die Geräte des Mikrowellensystems Sicard können von fahrenden Waggons und Lokomotiven Nummern automatisch ablesen und an einen Rechner, einen Streifenlocher oder einen Fernschreiber weitergeben. Mikrowellenreflektoren an den Fahrzeugen tragen als Information die zwölfstellige Fahrzeugnummer; sie werden durch eine Lesestelle im Gleis mit einem Mikrowellenstrahl abgefragt. Dieses System liest bei Regen, Nebel und Schnee; der Lesestrahl durchdringt sogar Schmutz, Zeltbahnen und Holz. In Verbindung mit digitalen Auswertemethoden lässt sich damit ein hoher Grad von Lesesicherheit erreichen.

Das von Siemens entwickelte System besteht im Prinzip aus den Wagengeräten, einem oder mehreren Lesegeräten und einem Verarbeitungsgerät. Das an der Waggonunterseite anzubringende Wagengerät entspricht in seiner elektrischen Wirkungsweise einer Antenne mit 24 Mikrowellenresona-

toren, die als Saugkreise wirken und deren Resonanzfrequenzen über einen 2-aus-5-Code die zwölf Ziffern der Wagenkennnummer darstellen. Das Lesegerät, das an bestimmten Stellen im Bahnhofsbereich zwischen den Schienen montiert ist, enthält die zum Senden und Empfangen nötigen Antennen, einen Mikrowellensender und -empfänger sowie ein Taktfilter. Das Prüfen und Auswählen der gelesenen Fahrzeugnummer übernimmt ein Verarbeitungsgerät, das neben den Gleisen aufgestellt und mit dem Lesegerät durch Kabel verbunden ist. Alle diese Geräte sind weitgehend wartungsfrei und unempfindlich gegen mechanische Einwirkungen und Witterungseinflüsse.

Kommt nun ein Wagengerät in den Einflussbereich eines Lesegeräts, wird es von einem Sender angestrahlt, der das Frequenzband von 3,1 bis 4,2 GHz in jeweils 0,5 ms einmal überstreicht. Das reflektierte und vom Empfänger des Lesegeräts aufgenommene Echosignal zeigt dann innerhalb jedes Frequenzhubes 24 impulsförmige Einbrüche – sogenannte Informationsimpulse –, die von den 24 Mikrowellenresonatoren des Wagengeräts hervorgerufen werden. Damit man mit dem erwähnten 2-aus-5-Code arbeiten kann, sind noch entsprechende Bezugsimpulse nötig. Dazu wird im Lesegerät ein Teil der Sendeenergie einem Taktfilter zugeführt, das mit Hilfe von 60 Mikrowellenresonatoren die gesamte Zeitspanne jedes Frequenzhubes in 60 impulsförmige Takschritte unterteilt. Jeder Ziffer der Wagenkennnummer sind nun fünf zusammenhängende Takschritte, darunter zwei Informationsimpulse, zugeordnet. Das Verarbeitungsgerät stellt fest, welche Takschritte mit den Informationsimpulsen des Empfangssignals zugleich zusammenfallen, und rekonstruiert dann daraus die eigentliche Fahrzeugnummer.

Lesesicherheit

Entsprechende Berechnungen haben ergeben, dass solche Lesesysteme nur dann wirtschaftlich bei der Bahn eingesetzt werden können, wenn bei einer Million Ablesungen höchstens ein Lesefehler auftritt. Auf eine grösstmögliche