

INFRAROTSIGNATURBEWERTUNG VON AGILEN UND HOCH GEPFEILTEN FLUGZEUGKONFIGURATIONEN

E. Lindermeir

DLR, Institut für Methodik der Fernerkundung,
Münchener Straße 20, Weßling, D-82234

M. Rütten

DLR, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik,
Busenstraße 10, Göttingen, D-37073

Zusammenfassung

Das DLR betreibt seit vielen Jahren Modelle zur Bewertung der Infrarot (IR)-Signatur von Flugzeugen. Für die Simulation der IR-Signatur agiler, eventuell unbemannter Flugzeuge wurde mit den hier durchgeführten Arbeiten das neue IR-Modell MIRA (Model for Infrared Scene Analysis) entwickelt. Es trägt den höheren Anforderungen bei der Signaturberechnung hoch getarnter Konfigurationen Rechnung. MIRA ermöglicht die Modellierung beliebig geformter Abgasstrahlen, die durch die typischerweise rechteckigen Gasauslässe entstehen. Zudem werden Mehrfach-Reflexionen sowohl auf der Flugzeugoberfläche als auch im Einlauf und im Abgassystem unter Berücksichtigung der bidirektionalen Reflektanzverteilungsfunktion (BRDF) bestimmt. Darüber hinaus enthalten die MIRA-Ergebnisse auch die Einflüsse der Atmosphäre und der vom Boden emittierten IR-Strahlung. Da der Abgasstrahl je nach Konfiguration auch von der Strömung um das Flugzeug beeinflusst werden kann, wurde MIRA mit dem DLR TAU Code gekoppelt. Bei diesem handelt es sich um ein Strömungsmodell, mit dem sowohl die Flugzeug-Umströmung als auch deren Mischung mit dem Abgasstrahl berechnet werden kann. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die Funktion sowie die aktuellen Fähigkeiten des entwickelten IR-Signaturmodells MIRA. Die Verwendung der gekoppelten Modelle MIRA und TAU im Entwurfsprozess wird anhand der Optimierung des Abgassystems eines unbemannten Flugzeugs demonstriert.

1. EINLEITUNG

Bei der Beurteilung von Militärflugzeugen ist deren Signatur von großer Bedeutung. Dies betrifft Emission und Reflexion in fast allen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums, von den sichtbaren über die infraroten bis zu den Wellenlängen im Radarbereich. Das Ziel, insbesondere die Infrarot-Signatur gering zu halten, hat in den letzten Jahren mit der Entwicklung und dem Einsatz unbemannter Fluggeräte an Bedeutung gewonnen. Um diesem Ziel gerecht zu werden, soll schon möglichst in der Entwurfsphase eines neuen Flugzeugs die IR-Signatur bewertet werden. Dazu werden entsprechende Computer-Modelle benötigt.

Grundsätzlich lassen sich UAV (unmanned aerial vehicles) im Infrarotbereich sehr gut tarnen. Je nach Anforderung kommt man mit relativ wenig Schub aus und es genügen Propellerantriebe, die wenig heißes Abgas produzieren. Falls nötig, kann dieses durch entsprechende Maßnahmen noch gekühlt werden. Da solche Flugzeuge mit geringer Geschwindigkeit fliegen, führt auch die aerodynamische Aufheizung zu keiner nennenswerten Abstrahlung.

Bei den in diesem Beitrag betrachteten Konfigurationen

wird jedoch hohe Agilität gefordert. Dies bedeutet, es muss wesentlich höherer Schub bereitgestellt werden, mit dem Agilität bis in den transsonischen Geschwindigkeitsbereich erreicht werden kann. Dies impliziert die Verwendung von Strahlantrieben, meist mit geringem Bypass-Verhältnis, eventuell auch mit Schubvektorsteuerung und Nachbrenner. Damit sind die typischen, von konventionellen Militärjets her bekannten Infrarot-Strahlungsquellen, wie heißes Abgas, heiße Triebwerksteile und aerodynamisch erwärmte Oberflächen, auch bei agilen UAV vorhanden.

Allerdings hat die Forderung nach Tarnung im Infrarotbereich heute höheres Gewicht als dies bei früheren Flugzeugentwicklungen der Fall war. Deshalb wird mehr Aufwand betrieben, um die Tarnung zu verbessern. Vorteilhaft ist dazu die Verwendung rechteckiger Auslässe für das Abgas. Diese führen zur effektiveren Durchmischung des Gasstrahls mit der Umgebungsluft und damit zu seiner schnelleren Abkühlung. Auch gelangt das Abgas meist nicht sofort nach der Düse in die Atmosphäre. Vielmehr wird es erst durch einen Abgaskanal geführt, in dem weitere Maßnahmen zur Kühlung installiert sind. Außerdem soll die Form dieses Kanals den direkten Blick auf heiße Triebwerksteile, z.B. die Niederdruck-Turbine, vermeiden oder zumindest einschränken. Ähnliche Maßnahmen werden auch am Einlauf durchgeführt, um Strahlung

von den warmen Kompressor-Schaufeln nach außen hin zu dämpfen.

Um die Effekte möglicher Maßnahmen zur Signaturreduktion schon möglichst frühzeitig im Designprozess eines Flugzeugs vorhersagen und beurteilen zu können, wurde am DLR die Entwicklung des IR-Signaturmodells MIRA (Model for Infrared Scene Analysis) begonnen. Im Folgenden werden zunächst die generell an ein IR-Signaturmodell zu stellenden Anforderungen dargelegt. Darauf folgt die Beschreibung der bisher implementierten Fähigkeiten von MIRA. Zuletzt wird anhand des Einsatzes des IR-Simulators im DLR Projekt FaUSST dargestellt, wie die Beurteilung der IR-Signatur auf Basis von Modellrechnungen in den Entwurfsprozess einfließen kann.

2. ANFORDERUNGEN AN EIN IR-SIGNATURMODELL

Die grundsätzlichen Anforderungen ergeben sich aus den wesentlichen Strahlungsquellen sowie der Interaktion von deren Strahlung mit Flugzeugteilen und der Umgebung. Als wichtige Infrarot-Emitter sind zu nennen

- der Abgasstrahl,
- warme Flugzeugoberflächen,
- Einlauf und Abgaskanal sowie
- die Umgebung, d.h. der Boden und die Atmosphäre.

Je nach Richtung, aus der das Flugzeug betrachtet wird, sind diese Strahlungsquellen unterschiedlich wichtig.

Ein IR-Signaturmodell muss nicht nur die von diesen Quellen emittierte Strahlung bestimmen können, sondern auch deren Ausbreitung in einer Szene. Dies bedeutet, es müssen Reflexionen an Oberflächen ebenso berechnet werden, wie die Dämpfung der Strahlung durch die Atmosphäre.

Zur Beurteilung der Detektierbarkeit ist es nicht ausreichend „realistisch aussehende Bilder“ zu erzeugen. Da die Detektion im Infrarotbereich durch Sensoren, wie etwa Suchköpfe in Flugkörpern, erfolgt, sind Bilder der Strahlungsverteilung sowie deren Spektren in physikalischen Einheiten zu berechnen.

Im Vergleich zur Beurteilung früherer Flugzeugentwürfe ist bei modernen, hochgetarnten Fluggeräten nicht nur die Tarnung aufwändiger, auch an die Modellierung der Signatur werden höhere Anforderungen gestellt.

So sind ältere Flugzeuge mit runden Düsen ausgestattet, die meist am Heck des Flugzeugs angebracht sind. Bei der Modellierung des Abgasstrahls kann somit das Strömungsfeld unabhängig von der Flugzeug-Umströmung betrachtet werden. Zudem darf angenommen werden, dass die im Abgasstrahl auftretenden Verteilungen des Drucks, der Temperatur und der Verbrennungsprodukte radialsymmetrisch vorliegen.

Bei modernen UAV-Entwürfen ist keine dieser Annahmen mehr zutreffend. Die Düse ist im Flugzeug untergebracht und das Abgas strömt, wie oben beschrieben, durch einen Kanal nach außen, der mit einem rechteckigen Auslass endet. Dieser befindet sich typischerweise nicht am Heck des Flugzeugs sondern auf seiner Oberseite, um die direkte Sichtbarkeit von unten zu vermeiden.

Für die Modellierung bedeutet dies eine wesentlich komplexere Berechnung des Strömungsfeldes des Abgases. Hier ist zunächst die Strömung im Inneren des Abgaskanals zu ermitteln, was durch eventuell vorhandene Einrichtungen zur Kühlung kompliziert wird. Außerhalb des Flugzeugs ist dann die Interaktion des Abgasstrahls mit der Strömung um das Flugzeug zu berücksichtigen. Da im Strömungsfeld keine Symmetrie mehr angenommen werden kann, ist sowohl bei den aerodynamischen als auch bei den IR-Signatur-Rechnungen eine vollständige 3D Modellierung notwendig.

Für die Strahlungsmodellierung stellt der Abgaskanal eine weitere Herausforderung dar. Er ist als Hohlraumstrahler zu behandeln, in dem sich mindestens ein starker Strahler befindet, welcher zumindest teilweise nicht direkt vom Auslass her sichtbar ist. Zudem ist der Hohlraum mit heißem Gas gefüllt, das Strahlung sowohl emittiert wie auch absorbiert. Zur Signaturbestimmung müssen daher viele Reflexionen berücksichtigt werden, die im Inneren des Abgaskanals auftreten können. Je nach Material sind die dabei auftretenden Reflexionsgrade abhängig vom Ein- und Ausfallwinkel. Zusätzlich beeinflusst jeweils zwischen den Reflexionen an der Kanalwandung die Emission und die Transmission des Abgases die resultierende Strahlung aus dem Hohlraum.

Für die Beurteilung der Detektierbarkeit ist weniger die abgestrahlte Strahlungsleistung als absolute Größe sondern der Kontrast zur Strahlung des Hintergrundes maßgebend. Deshalb muss ein IR-Signaturmodell auch die Signatur des Hintergrundes bestimmen können. Es ist deshalb die Strahlung des Bodens und der Atmosphäre zu modellieren. Während der Boden als Quelle zu betrachten ist, deren Strahlung durch Reflexion am Flugzeug einen erheblichen Beitrag zur Signatur betragen kann, ist bei der Atmosphäre vor allem ihre spektral stark variiierende Dämpfung der Infrarotstrahlung zu modellieren.

3. IR-SIGNATURMODELL MIRA

MIRA basiert auf dem Strahlverfolgungsverfahren (Raytracing). Die Wahl dieser Methode ergibt sich aus der Notwendigkeit, Mehrfachreflexionen in Hohlräumen zu modellieren, bei denen die bidirektionale Reflektanz-Verteilungsfunktion (BRDF) zu berücksichtigen ist. Dieses Verfahren hat auch im Hinblick auf die zukünftige Erweiterbarkeit MIRAs den Vorteil, dass im Prinzip alle physikalischen Effekte korrekt modelliert werden können. Die Einschränkung „im Prinzip“ resultiert daher, dass unter Umständen sehr viele Strahlen erzeugt und verfolgt werden müssen, was zu sehr langen Rechenzeiten führen kann. Ein weiterer, nicht zu unterschätzender Vorteil des Raytracings ist, dass der Aufwand in der Bilderzeugung nur logarithmisch mit der Anzahl der notwendigen Facetten zur Darstellung der Geometrie ansteigt. So können auch hochaufgelöste Facetten-Modelle der Flugzeuge, mit oft mehreren 10 Millionen Facetten, wie sie für die Strö-

mungsfeld-Rechnung benötigt werden, direkt in der Bildzeugung verwendet werden.

3.1. Modellierung des Abgases

3.1.1. Strömungsfeld-Rechnung

Die für die Bestimmung der IR-Signatur des Abgases nötigen Druck-, Temperatur-, und Konzentrationsverteilungen werden mit Hilfe eines CFD (computational fluid dynamics) Modells bestimmt. Die dazu verwendete Software ist der DLR TAU Code [1, 2]. Dieser kann den oben beschriebenen Effekt der Mischung des Abgases mit der Flugzeugumströmung und der umgebenden Atmosphäre in der Rechnung berücksichtigen. Die Randbedingungen sind dabei die Zustandsgrößen des Gases in der Austrittsebene der Düse, die Fluggeschwindigkeit sowie der Zustand der umgebenden Atmosphäre (Druck, Temperatur und Spurengaskonzentrationen). Der Gaszustand in der Düsenaustrittsebene wird mit einem entsprechenden Triebwerksmodell abhängig vom jeweiligen Betriebszustand bestimmt. Im Projekt FaUSST wurden diese Berechnungen vom DLR-Institut für Antriebstechnik durchgeführt.

Das Ergebnis der CFD Rechnungen sind nicht nur die Zustandsgrößen des Abgases. Der TAU Code ermittelt zugleich die Oberflächentemperaturen des Flugzeuges, die aus der aerodynamischen Aufheizung resultieren. Die Ergebnisse werden auf einem 3D Gitter erzeugt, das aus 3D-Zellen (Tetraedern, Hexaedern, und Keilen) besteht. Dabei sind die Zustandsgrößen jeweils an den Ecken dieser Zellen gegeben. Zusätzlich sind in dem Gitter diejenigen 3D-Zellen markiert, die an die Flugzeugoberfläche angrenzen. Damit kann das Modell der Flugzeugoberfläche bestehend aus 2D-Zellen (Dreiecke und Quadrate) extrahiert werden, das für das Raytracing benötigt wird. Bild 1 veranschaulicht ein solches Gitter. Es vermittelt am Beispiel einer Temperaturverteilung um den Abgasauslass eines UAV-Halbmodells einen Eindruck von der hohen örtlichen Auflösung, die für die CFD-Rechnung erforderlich ist.

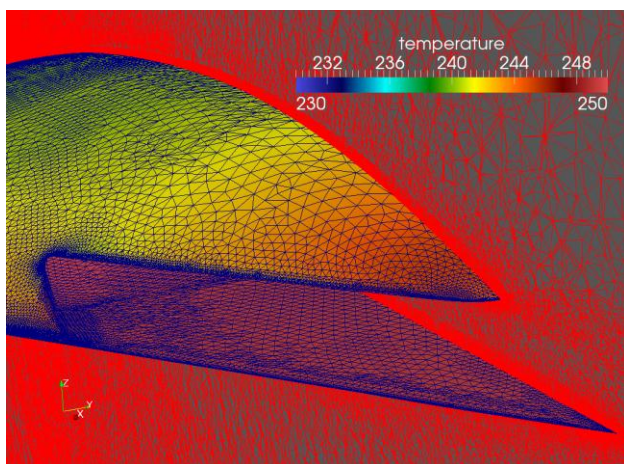


BILD 1. Ausschnitt aus dem CFD Gitter des DLR-F17 Entwurfs (Halbmodell) mit farblicher Darstellung der Temperaturverteilung.

3.1.2. IR-Strahlung des Abgases

Da die TAU-Netze einen großen Teil der Umgebung um das Flugzeug beinhalten, werden für die Verwendung in MIRA nur die tatsächlich benötigten Teile extrahiert, d.h. die Flugzeugoberfläche, der Einlauf, der Abgaskanal, und der Abgasstrahl. Auch bei den Zustandsgrößen werden nur die notwendigen Daten übernommen (z.B. keine Strömungsgeschwindigkeiten). Andererseits werden zusätzliche Informationen erzeugt. So ist es z.B. sinnvoll zu jeder Zelle die Nachbarzellen zu kennen. Diese Information wird zur Bestimmung der Schnittpunkte eines Sichtstrahls mit den Gitterzellen des Abgases sehr oft gebraucht. Deshalb werden diese Nachbarschaftsbeziehungen nur einmal, vorab ermittelt. Weiterhin müssen den Facetten Materialien, und damit Reflexionseigenschaften in Form einer BRDF, zugewiesen werden.

Mit diesen Informationen wird die vom Abgas emittierte IR Strahlung berechnet. Dazu wird während des Raytracings bei jedem Sichtstrahl geprüft, ob er den Abgasstrahl durchläuft. Ist dies der Fall, dann werden alle Schnittpunkte mit dem Abgasgitter sowie die zugehörigen Zustandsgrößen (Druck, Temperatur, Konzentrationen) bestimmt. So erhält man den Verlauf der Zustandsgrößen entlang des Strahls.

Auf Grundlage dieser Verläufe müssen dann die emittierte Strahldichte sowie der Transmissionsgrad des Abgases bestimmt werden. Da typischerweise sehr viele Strahlen erzeugt werden, wird hierfür ein sehr schnelles Verfahren benötigt. Bandenmodelle zählen zu den schnellsten derartigen Verfahren. In MIRA kommt ein statistisches Goody Bandenmodell [3] zum Einsatz, das sich vielfach bewährt hat. Die Datenbasis dieses Modells (Absorptionsparameter und Liniendichten) wurde wie in [4] beschrieben auf den Stand der hochauflösenden Datenbasis HITEMP 2010 [5] gebracht.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass MIRA auch kompatibel zu früher verwendeten IR- und CFD-Modellen ist. Es existiert eine zweite Variante zur Behandlung von Abgasstrahlen, deren Druck-, Temperatur-, und Konzentrationsverteilungen radialsymmetrisch sind. Diese werden dann als zweidimensionale Gebilde behandelt. Dabei ist eine Koordinate der Abstand von der Düse, die andere ist der radiale Abstand von der Längsachse des Abgasstrahls.

3.2. Einfluss von Atmosphäre und Boden

Die Strahlungseigenschaften von Atmosphäre und Boden werden durch Kopplung von MIRA mit dem kommerziellen Programm MODTRAN [6, 7] bestimmt. MODTRAN gilt hierfür als Standard-Modell. Es bestimmt die atmosphärische Transmission und die emittierte Strahldichte entlang einer Sichtlinie. Diese geht aus von einer gegebenen Sensorposition und endet entweder an einer definierten, zweiten Position, oder am Boden, oder in der maximalen Höhe der Atmosphäre, die für MODTRAN bei 100 km endet.

MODTRAN bietet verschiedene Standard-Atmosphärenmodelle, die typischen, von der geographischen Breite und der Jahreszeit abhängigen Verhältnissen entsprechen. Die verschiedenen Bodenarten sind charakterisiert durch ihre spektralen Reflexionsgrade. Außerdem ist ein

Streumodell enthalten, mit dem der Einfluss von Wolken berücksichtigt werden kann.

Für den Einsatz in Verbindung mit MIRA wäre es zu aufwändig, MODTRAN bei jedem erzeugten Strahl während der Bilderzeugung aufzurufen. Dies ist auch nicht nötig. Denn zur Bestimmung des Einflusses von Atmosphäre und Boden genügt es, Strahlung und Dämpfung entlang vier verschiedener Typen von Sichtlinien zu bestimmen.

- 1) Sichtlinien direkt vom Beobachter (Kamera) zum Boden oder zum Himmel
- 2) Sichtlinien vom Flugzeug (der Szene) zum Boden oder zum Himmel
- 3) Sichtlinien vom Beobachter zur Flugzeug
- 4) Sichtlinien zwischen Flugzeugteilen (in der Szene)

Die Sichtlinientypen 1 und 2 hängen ab vom Zenit- und Azimut-Winkel. Die Typen 3 und 4 von der Länge der Sichtlinien.

Nach dem Programmstart bestimmt MIRA die benötigten Winkel- und Längenbereiche und erzeugt vier Interpolationsdatenbasen für die vier Typen von Sichtlinien. Mit Hilfe dieser Daten können dann während der Bilderzeugung die benötigten atmosphärischen Spektren sehr schnell bestimmt werden.

3.3. Emission und Reflexion von Oberflächen

Für das Rendering, d.h. die Bilderzeugung, sind Mehrfachreflexionen zu berücksichtigen. In den letzten Jahrzehnten sind hierfür eine Reihe von Verfahren entwickelt worden. Man kann diese einteilen in mittelwertfreie und solche, die die Strahldichten mit einem gewissen Offset ermitteln. Dieser ist oft sehr klein, ja vernachlässigbar. Dies gilt insbesondere dann, wenn die berechneten Bilder von Menschen betrachtet werden sollen.

In MIRA wurde das mittelwertfreie Metropolis-Rendering Verfahren implementiert. Als grundlegende Arbeit beschreibt [8] diesen auf dem Strahlverfolgungsverfahren (*Path-Tracing*) basierenden Algorithmus. Im Folgenden wird daher nur ein Überblick gegeben.

Strahlverfolgungsverfahren. Die grundlegende Idee des Path-Tracing besteht darin, die reflektierten Strahlungsbeiträge nach der Anzahl der Reflexionen zu bestimmen. D.h. zuerst werden die Beiträge berechnet, die durch nur eine Reflexion entstehen, dann werden diejenigen addiert, die durch zwei, dann drei usw. Reflexionen verursacht sind. Theoretisch sind unendlich viele Reflexionen zu berücksichtigen. Da jedoch mit jeder Reflexion sowie mit zunehmender Weglänge die Transmission von der Quelle zur Kamera sinkt, kann man meist nach wenigen Reflexionen abbrechen. Dementsprechend wichtig ist die erste Reflexion. Die oben genannte Aufteilung macht es möglich, Verfahren unterschiedlicher Genauigkeit (und entsprechend unterschiedlichen Aufwandes) einzusetzen.

Erste Reflexion. Die reflektierte Strahldichte nach einer Reflexion berechnet sich nach Gl. (1).

$$(1) \quad L_{\text{refl}}(\omega_o) = \int_{\text{Halbraum}} \text{BRDF}(\omega_o, \omega_i) L(\omega_i) |\cos \theta_i| d\omega_i$$

Dabei ist $L_{\text{refl}}(\omega_o)$ die in Richtung ω_o reflektierte Strahldichte, $L(\omega_i)$ die aus der Richtung ω_i einfallende Strahldichte, die dort von einer Facette emittiert wird. $\text{BRDF}(\omega_o, \omega_i)$ ist die zu den Richtungen ω_o und ω_i gehörende bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion und θ_i ist der zur Richtung ω_i gehörende Zenit-Winkel. Diese Größen sind in Bild 2 veranschaulicht.

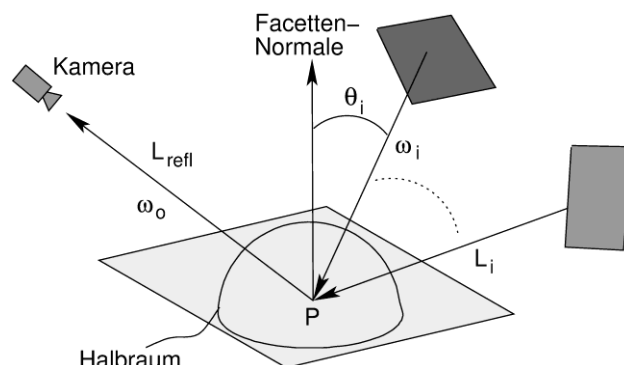


BILD 2. Veranschaulichung der in Gl. (1) auftretenden Größen.

Das Integral in Gl. (1) wird mit Hilfe des Monte-Carlo Verfahrens gelöst. Dabei wird in MIRA generell die Variante des sogenannten *importance sampling* verwendet. Dies bedeutet, dass für die Abtastung des Integranden (d.h. für die Stützstellen zur Approximation des Integrals) eine Wahrscheinlichkeitsverteilung festgelegt wird, die dafür sorgt, dass die verwendeten Stützstellen möglichst große Beiträge liefern. Anders ausgedrückt: Es wird eine Wahrscheinlichkeitsverteilung verwendet, die proportional zum Integranden ist.

In Gl. (1) liegt ein Produkt aus BRDF und einfallender Strahlung vor. Hierfür eine Gesamt-Wahrscheinlichkeitsverteilung anzugeben ist praktisch nicht möglich. Die Methode des *multiple-importance sampling*, wie in [8] beschrieben, wurde für derartige Fälle entwickelt. Multiple-importance sampling sorgt dafür, dass die Auswahl der Stützstellen sowohl gemäß der Wahrscheinlichkeitsverteilung der BRDF als auch gemäß der Verteilung der einfallenden Strahldichte (also der starken Strahler in der Szene) erfolgt. Zusätzlich wird bei der Definition der Geometrie festgelegt, wie viele Abtastwerte $L(\omega_i)$ von den einzelnen Strahlern für Gl. (1) verwendet werden sollen.

In MIRA werden bei der Lösung der Gl. (1) für die erste Reflexion alle Strahler in der Szene berücksichtigt. Bei den folgenden Reflexionen wird nur ein zufällig ausgewählter Strahler verwendet und sein Beitrag entsprechend der Wahrscheinlichkeit gewichtet, mit der er gewählt wurde. Das Integral wird dadurch, dass viele Strahlen erzeugt werden, trotzdem richtig abgeschätzt.

Mehrfach-Reflexionen. In einer einfachen Variante des Strahlverfolgungsverfahrens werden Strahlen von der Kamera aus erzeugt. Bei jedem Schnittpunkt mit Objekten in der Szene, an dem eine Reflexion erfolgt, wird der Weg mit einem neuen Strahl fortgesetzt. Dessen Richtung wird gemäß der Wahrscheinlichkeitsverteilung der BRDF gewählt. Der Nachteil dieser Methode der Wegerzeugung nur von der Kamera aus besteht darin, dass die Wahrscheinlichkeit, Beiträge von Strahlungsquellen zu erfassen, die von der Kamera aus nicht direkt sichtbar sind, sehr gering ist.

Anstatt sehr viele Strahlen zu erzeugen, und damit lange Rechenzeiten zu verursachen, ist es wesentlich effektiver, bei der Konstruktion der Wege sowohl von der Kamera als auch von den (starken) Strahlern in der Szene auszugehen. Die so erzeugten, zunächst unvollständigen Teil-Wege werden dann in geeigneter Weise verbunden. Dieses Verfahren ist unter dem Namen *Bidirectional Path-Tracing* bekannt.

Metropolis-Rendering. Bei der Anwendung des Path-Tracing Verfahrens beginnen die einzelnen Wege bei der Kamera. Die hier generierten, ersten Strahlen sollen die Bildebene gleichmäßig abtasten. Typischerweise werden für jedes Pixel gleich viele Strahlen erzeugt. Für jeden davon wird, wie oben erläutert, erst der Beitrag der ersten Reflexion bestimmt und dann die Beiträge der Mehrfachreflexionen. Dies ist im Allgemeinen zwar sinnvoll. Bei der hier betrachteten speziellen Anwendung, bei der die Szene aus einem Flugzeug, der Atmosphäre und dem Boden besteht, treten Mehrfachreflexionen aber hauptsächlich im Abgaskanal und im Einlauf auf (wobei typischerweise immer nur einer von beiden zu sehen ist).

Es ist daher ein Verfahren sinnvoll, das sich bei der Berechnung der Mehrfachreflexionen möglichst auf den Abgaskanal bzw. den Einlauf konzentriert. Dies ist mit dem Metropolis Verfahren möglich. Es generiert, ähnlich einer Markov-Kette, eine Folge von Stützstellen (Bildpunkten) mit großen Funktionswerten (Strahldichten an der Kamera). Dabei ist zu beachten, dass diese Folgen, sobald ein großer Funktionswert gefunden ist, in der Umgebung der zugehörigen Stützstelle bleiben. Deshalb ist, nachdem einige große Beiträge gefunden sind, eine neue Folge zu erzeugen.

Der Ablauf in MIRA ist folgender: Zuerst wird ein Bild berechnet, bei dem nur die erste Reflexion berücksichtigt wird. Die Bildebene muss dazu gleichmäßig abgetastet werden. Hierfür werden nicht nur gleichverteilte Zufallszahlen verwendet. Um die Gleichverteilung über der Pixel-Matrix weiter zu verbessern, wird das Low-Discrepancy Abtastverfahren [9, 10] eingesetzt. Anschließend wird in der Metropolis-Phase mit Hilfe gleichverteilter Zufallszahlen eine Reihe von Bildpunkten erzeugt, die als Ausgangspunkte für die vom Metropolis-Verfahren generierten Folgen von Bildpunkten dienen. Die initialen Bildpunkte sind somit zwar gleichmäßig über das gesamte Bild verteilt. Eine gewisse Anzahl von Strahlen pro Pixel wird aber nur im Mittel erreicht. Von jedem mit den Metropolis Verfahren erzeugtem Bildpunkt ausgehend werden dann gemäß dem bidirektionalen Strahlverfolgungsverfahren Wege für die Berechnung der Beiträge der Mehrfachreflexionen erzeugt. Auf diese Weise wird erreicht, dass sich das Rendering auf die Bereiche konzentriert, in denen tatsächlich Mehrfachreflexionen auftreten.

4. OPTIMIERUNG DER ABGAS-SIGNATUR DES DLR-F17

Im Projekt FaUSST hat das DLR seine Expertise zur Beurteilung von Flugzeugentwürfen gebündelt. Mehrere DLR-Institute aus den Forschungsbereichen Antriebs-technik, Aerodynamik, Flugregelung, Flugdynamik und Signaturen arbeiteten hier an der Verknüpfung ihrer speziell für das Flugzeug-Design verfügbaren Softwarepakete. Die entwickelten Methoden und ihr Zusammenspiel wurden am Beispiel einer als *DLR-F17* bezeichneten

Konfiguration erprobt. Im Rahmen dieses Projekts fand auch ein Teil der am Institut für Methodik der Fernerkundung durchgeführten Arbeiten zur MIRA-Entwicklung statt. Darüber hinaus wurde MIRA innerhalb des Projekts FaUSST eingesetzt, um mögliche Verbesserungen des DLR-F17 Entwurfs hinsichtlich seiner IR-Signatur zu beurteilen.

Zur Behandlung dieser Thematik wurde die Konfiguration mit einem Einlauf und einem Abgaskanal ausgestattet. Die Bilder 3 und 4 zeigen das so entstandene UAV. Für den Antrieb wurde zunächst ein (in den Bildern nicht dargestelltes) Turbofan-Triebwerk mit einem Bypass-Verhältnis von etwa 2 vorgesehen. Der Querschnitt des Abgaskanals in Bild 4 ändert sich von kreisförmig am Triebwerk zu rechteckig am Heck des Flugzeuges. Außer dem bei diesen Flugzeugen typischen S-Schlag zur Vermeidung der direkten Sicht auf die heißen Triebwerkskomponenten weist der Kanal keine Besonderheiten auf. Er wird im Folgenden als „einfacher Abgaskanal“ bezeichnet.

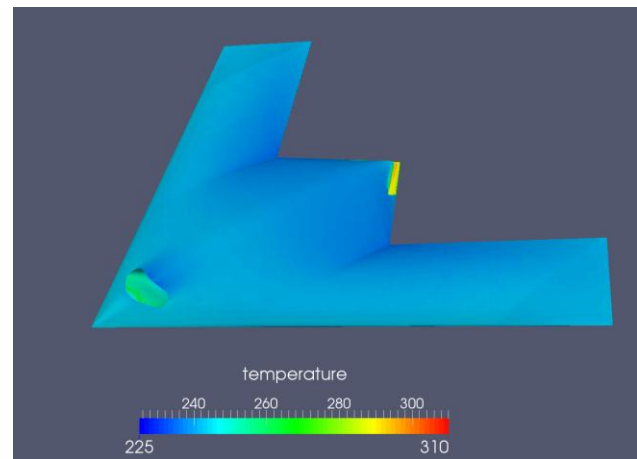


BILD 3. DLR-F17 mit farblicher Darstellung der Temperaturverteilung.

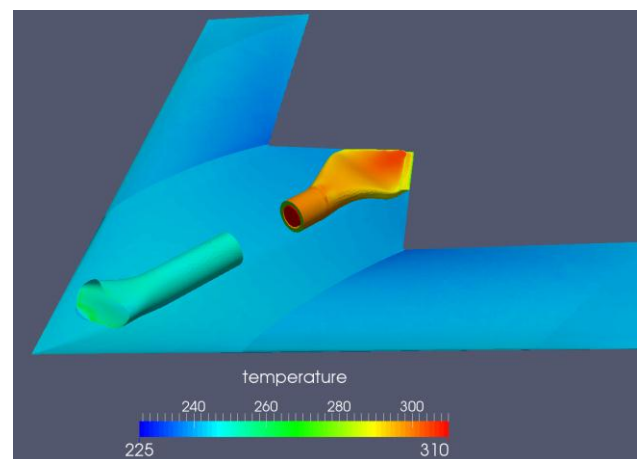


BILD 4. DLR-F17 ohne Rumpfberteil zur Darstellung von Einlauf und Abgaskanal mit Temperaturverteilung.

MIRA ermittelte die IR-Signatur dieses Designs für den Fall „Reiseflug“. Konkret betrug dabei die Flughöhe 11 km und die Geschwindigkeit Mach 0,8. Die atmosphärischen

Bedingungen entsprachen der Internationalen Standardatmosphäre (ISA). Der in der Rechnung angenommene Sensor war im Spektralbereich $3,3 - 5 \mu\text{m}$ empfindlich. Dieser Wellenlängenbereich ist besonders zur Detektion des Verbrennungsprodukts CO_2 geeignet. Die Entfernung zwischen Beobachter und Flugzeug betrug 5 km . Dabei war die Blickrichtung von schräg hinten (Azimut-Winkel 30° zur Längsachse des UAV) einmal von oben gegen den Boden (Elevationswinkel 25°) und einmal von unten gegen den Himmel (Elevationswinkel -25°) gerichtet. Die berechneten Bilder der IR-Signatur sind in den Abbildungen 5 und 6 dargestellt. Die IR-Emission des Abgases ist in beiden Bildern deutlich zu erkennen.

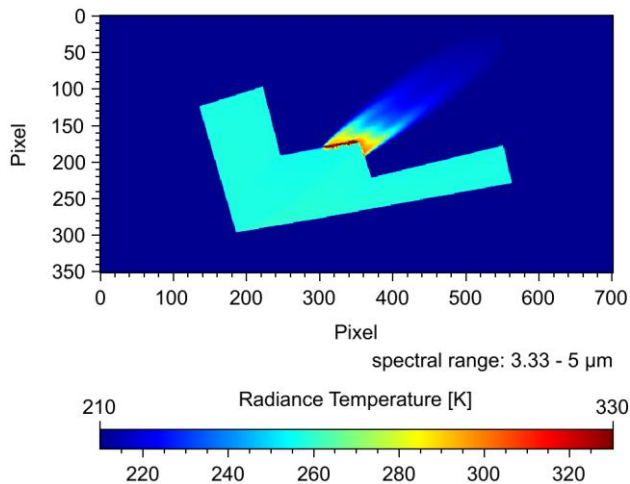


BILD 5. IR-Signatur des DLR-F17 mit Turbofan-Triebwerk und einfachem Abgaskanal beim Blick von unten gegen den Himmel.

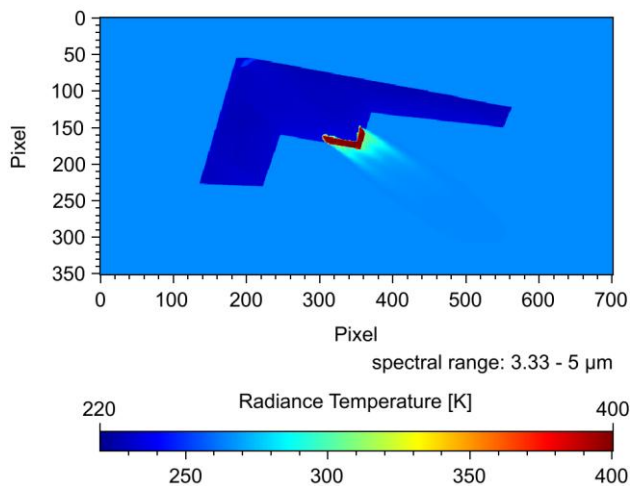


BILD 6. IR-Signatur des DLR-F17 mit Turbofan-Triebwerk und einfachem Abgaskanal beim Blick von oben gegen den Boden.

Ziel war es, die IR-Emission des Abgases zu verringern. Dazu wurden zwei Maßnahmen ergriffen. Einerseits wurde das Turbofan-Triebwerk durch eines vom Typ *Variable-Cycle-Engine (VCE)* ersetzt. Derartige Triebwerke arbeiten mit variablem Bypass-Verhältnis. Dies hat den Vorteil, dass ihr spezifischer Schub und damit ihr Treibstoffverbrauch nicht nur für einen Betriebspunkt optimiert wird. Vielmehr kann die Auslegung für verschiedene, während

einer Mission relevante Betriebszustände erfolgen. Mit Blick auf die IR-Signatur hatte schon diese Änderung den positiven Effekt, dass die Abgastemperatur am Anfang des Abgaskanals von 487 K auf 400 K sank.

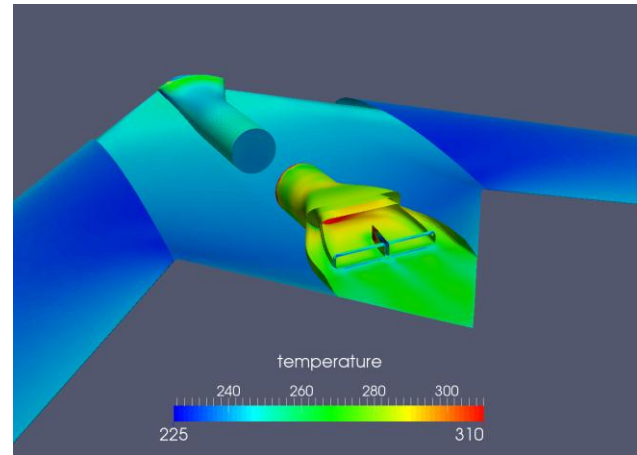


BILD 7. Abgaskanal des DLR-F17 mit Einrichtung zur Mischung der Gase aus der Brennkammer mit der Bypass-Luft.

Die zweite Änderung betraf den Abgaskanal selbst. Hier wurde die Durchmischung des Abgases aus der Brennkammer mit der Bypass-Luft verbessert. Dies erfolgte durch einen zusätzlichen Tubus, der sich bis fast an das Ende des Abgaskanals erstreckte (Bild 7). Der Tubus teilte das heiße Abgas an seinem Ende in zwei Teile auf. Diese Aufteilung ermöglichte ein Einmischen der Bypass-Luft in das Zentrum der heißen Abgase. Zusätzlich verursachte der Tubus höhere Strömungsgeschwindigkeiten. Beide Effekte führten zu verbesserter Durchmischung des heißen Abgases zunächst mit kalter Bypass-Luft und dann nach Austritt aus dem Kanal mit der Umgebungsluft.

Die Auswirkungen dieser Maßnahmen auf die IR-Signatur zeigen die Ergebnisse von MIRA Rechnungen, die in den Bildern 8 und 9 dargestellt sind. Die IR-Strahlung des Abgases ist von der des Hintergrundes nicht mehr zu unterscheiden. Ein Vergleich der emittierten Strahlung am Ende des Abgaskanals in den Bildern 6 und 9 zeigt die erhebliche Temperaturreduktion, die dort erzielt wurde. Das Ziel der Optimierung wurde somit vollständig erreicht.

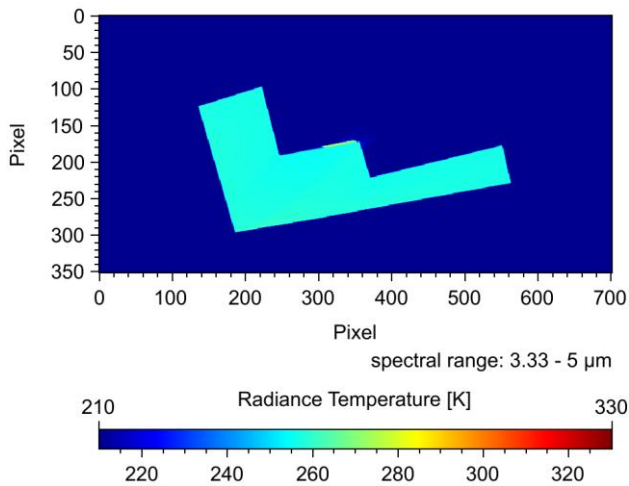


BILD 8. IR-Signatur des DLR-F17 mit VCE-Triebwerk und gesplittetem Tubus im Abgaskanal beim Blick von unten gegen den Himmel.

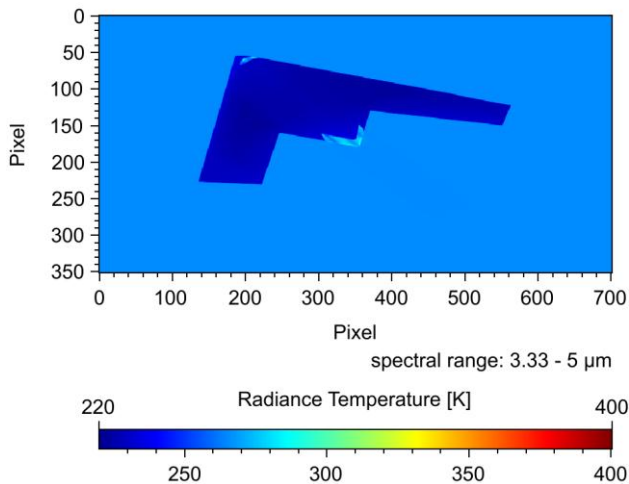


BILD 9. IR-Signatur des DLR-F17 mit VCE-Triebwerk und gesplittetem Tubus im Abgaskanal beim Blick von oben gegen den Boden.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass mit den oben genannten Maßnahmen die angestrebte Reduktion der IR-Emission des Abgases zwar erreicht wurde, dass dies aber nicht in jedem Fall positiv für einen geringen Kontrast und damit geringe Detektionswahrscheinlichkeit ist. Tatsächlich ist die Verringerung der Abgastemperatur nur beim Blick gegen den Himmel vorteilhaft. MIRA ermittelt hier für den Fall mit „einfachem Kanal“ eine Kontrast-Strahlungstemperatur von 26 K, die mit VCE-Triebwerk und Tubus auf 16 K verringert wird. Eine Minderung des Kontrasts ist auch plausibel. Durch Reduktion der Abgas-Strahlung verringert sich der positive Kontrast gegen den kalten Himmel. Beim Blick gegen den Boden ist die Gesamt-Signatur des Flugzeugs aber schon mit „einfachem Kanal“ geringer als die Strahlung vom Boden. Dies äußert sich in einem negativen Kontrast von -20 K. Durch weitere Signatur-Reduktion wird der Kontrast auf -49 K verschlechtert – eine Detektion also wesentlich erleichtert. Die erhebliche Verschlechterung des Kontrastes um -29 K ist dabei nicht auf die spektral relativ schmalbandige Strahlung des Abgases, sondern auf die oben erwähnte Abkühlung des Abgaskanals am Heck des Flugzeugs zurückzuführen.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Am DLR Institut für Methodik der Fernerkundung wurde im Rahmen des Projekts FaUSST mit der Entwicklung des Infrarot-Strahlungsmodells MIRA begonnen. Dieses Modell ist Teil eines multidisziplinären DLR Softwarepools zur Beurteilung von Flugzeugentwürfen. MIRAs Fähigkeiten tragen den Anforderungen zur Modellierung der IR-Signaturen moderner, agiler, und hoch getarnter Flugzeug-Konfigurationen Rechnung.

In der gegenwärtigen Entwicklungsstufe modelliert MIRA alle wichtigen Strahlungskomponenten. Diese bestehen aus den Emissionen von Flugzeug-Oberflächen, vom Abgas und von den Hohlräumen, Einlauf und Abgaskanal. Die bei letzteren auftretenden Mehrfachreflexionen werden berücksichtigt. Ebenso umfasst die MIRA Modellierung den Einfluss der Umgebung, d.h. der Atmosphäre und des Bodens. Letzteres ist für die Beurteilung der Signatur im Infrarotbereich besonders wichtig, da der Kontrast zum Hintergrund die Größe ist, die mit der Detektionswahrscheinlichkeit korreliert. Eine zukünftige Erweiterung wird in der Implementierung eines Geländemodells bestehen, mit dem ein strukturierter und damit realitätsnäherer Bodenhintergrund in der Modellierung verwendet werden kann.

Das Beispiel der Minimierung der Abgas-Signatur stellt eine typische Anwendung von MIRA dar. Mit Hilfe der Ergebnisse der IR-Modellierung konnten die erzielten Effekte quantitativ beurteilt werden. Gleichzeitig demonstriert dieses Beispiel auch, dass bei hoch getarnten UAV Entwürfen einfache Betrachtungen nicht ausreichen, um zu optimalen Ergebnissen zu gelangen. Die Komplexität der Konfigurationen erfordern auch auf der Seite der Modellierung höhere Komplexität sowie Umsicht bei der Beurteilung. Der bisher erreichte Entwicklungsstand von MIRA ist eine erste Antwort auf diese Anforderungen. Die weitere MIRA-Entwicklung soll die Infrarot-Modellierungsfähigkeit des DLR noch weiter steigern.

- [1] Schwamborn, D., Gardner, A., von Geyr, H., Krumbain, A., Lüdeke, H., Stürmer, A. (2008). Development of the TAU-Code for aerospace applications. *50th NAL International Conference on Aerospace Science and Technology, 2008-06-26 - 2008-06-28, Bangalore, India.*
- [2] Alrutz, T., Rütten, M. (2005). Investigation of Vortex Breakdown over a Pitching Delta Wing applying the DLR TAU-Code with Full, Automatic Grid Adaptation. *AIAA-2005-5162, Toronto, Canada.*
- [3] Ludwig, C.B., Malkmus, W., Reardon, J.E., Thomson J.A.L. (1973). Handbook of Infrared Radiation from Combustion Gases. *NASA report SP-3080, Scientific and Technical Information Office, Washington D.C..*
- [4] Lindermeir, E., Beier, K. (2012). HITEMP derived spectral database for the prediction of jet engine exhaust infrared emission using a statistical band model. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 113, 1575–1593.
- [5] Rothman, L.S., Gordon, I.E., Barber, R.J., Dothe, H., Gamache, R.R., Goldman, A., Perevalov, V.I., Tashkun, S.A., Tennyson, J. (2010). HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 111, 15, S. 2139–2150.

- [6] Berk, A., P.K. Acharya, L.S. Bernstein, G.P. Anderson, J.H. Chetwynd, Jr., M.L. Hoke (2000). Reformulation of the MODTRAN band model for finer spectral resolution, *Proc. SPIE* Vol. 4049, Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VI.
- [7] Berk A., G.P. Anderson, P.K. Acharya, E.P. Shettle, MODTRAN 5.2.1 User's Manual (2011). *Spectral Sciences, Inc., Fourth Ave., Burlington, MA 01803-3304*.
- [8] Veach, E. (1998). Robust Monte Carlo methods for light transport simulation, PhD thesis, *Stanford University, Stanford, CA, USA*.
- [9] Shirley, P. (1991). Discrepancy as a quality measure for sample distributions. *Eurographics '91*, S. 183-191.
- [10] Kolling, T., Keller, A. (2002). Efficient multidimensional sampling. *Computer Graphics Forum (Proceedings of Eurographics 2002)*, Vol. 21, S. 557-563.