

PHYSIKALISCH BASIERTE ERZEUGUNG MULTISPEKTRALER SZENARIEN UND BILDDATEN MIT PHYSIG

R. Weyßer, P. Schneider, C. Weizel, U. Semmler,
Diehl-BGT-Defence GmbH & Co. KG, Alte Nußdorfer Straße 13, 88662 Überlingen,
Deutschland

Zusammenfassung

Moderne Flugkörper- und Aufklärungssysteme mit bildgebenden Sensoren werden unter Verwendung von Simulationsmodellen und Simulationstechniken ausgelegt und bewertet. Diese Simulationsmodelle müssen sowohl die vom Sensor gemessene Umwelt, als auch den Sensor in seinen physikalischen Eigenschaften korrekt darstellen.

Um diese Anforderungen an die Simulationsmodelle zu erfüllen, wurde von der Firma DBD das multispektrale Simulationssystem PhySIG (**Physics based Scene and Image Generation**) bedarfsorientiert im Rahmen einer Vielzahl von nationalen und internationalen Projekten entwickelt.

Wichtig ist hierbei, dass PhySIG natürliches Gelände, sowie bebaute und urbane Landschaft präzise in ihrer Abhängigkeit von physikalischen Parametern und Materialeigenschaften beschreiben kann. Ebenso werden die physikalischen Eigenschaften der Atmosphäre korrekt dargestellt. Modellerte Luft- und Bodenfahrzeuge können sich in einer solchen Umgebung bewegen, die von diesen emittierte und reflektierte Strahlung folgt den physikalischen Gesetzmäßigkeiten und liefert mit Messungen vergleichbare Ergebnisse. Neben beweglichen Fahrzeugen, sind auch sogenannte Täuschmittel in Bezug auf ihre Kinematik, Geometrie, zeitliches Verhalten und ihre spektrale Strahlungscharakteristik physikalisch korrekt abgebildet.

Eine weitere wesentliche Eigenschaft ist die Einbindbarkeit dieser Simulationsmodelle in echtzeitfähige Flugkörpersimulationen unterschiedlicher Ausprägung.

Das Simulationssystem hat sich in reinen Software- als auch in Hardware-in-the-Loop-Simulationen unter Echtzeit- und Nicht-Echtzeitbedingungen bewährt.

Die Einzelkomponenten wie die Darstellung des Hintergrundes, der Atmosphäre, von Zielen und Täuschkörpern haben einen vom öffentlichen Auftraggeber formal anerkannten Validierungsprozess durchlaufen. Damit sind die Gültigkeit und die Realitätsnähe der Teilmodelle und des Gesamtsystems PhySIG für die Bewertung von Flugkörperleistungen in einem komplexen multispektralen Szenarium international anerkannt.

1. EINLEITUNG

Für die Entwicklung, den Test und die Verifikation von Suchköpfen mit eigener Bildverarbeitung werden Standardsimulationstechniken eingesetzt. Bei diesen Simulationstechniken wird einem simulierten Sensormodell mit Bildverarbeitung ein synthetisch erzeugtes Sensorsignal, basierend auf einem vordefinierten synthetischen Szenarium, eingespeist. Ein solches Szenarium besteht im Wesentlichen aus Hintergrund, Atmosphäre, Zielobjekten, Störobjekten und weiteren Effekten. Die simulationstechnische Realisierung von Szenarien kann dabei in unterschiedlichen Spektralbändern, in verschiedenen Abschnitten eines Infrarot-Spektralbandes oder auch im sichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums erfolgen. Der Schwerpunkt der Anforderungen aus den Projekten der letzten Jahre lag bei DBD im Infrarotbereich (IR) des elektromagnetischen Spektrums. Die nachfolgenden

Ausführungen beziehen sich daher hauptsächlich auf diesen Spektralbereich.

2. AUFBAU DES SZENARIUMS

Ein Szenarium setzt sich aus den Komponenten Hintergrund, Atmosphäre, Objekten und Gegenmaßnahmen zusammen. Die einzelnen Komponenten werden unter Verwendung von unterschiedlichen Tools und z. T. auch unterschiedlichen Ansätzen simulationstechnisch dargestellt.

2.1. Hintergrund

Der Hintergrund eines Szenariums setzt sich aus einem topographischem Oberflächenmodell und Himmel mit Wolken zusammen. Für einfache Testzwecke werden homogene ebene Hintergründe mit oder ohne Texturen verwendet, für den blauen Himmel im infraroten

Spektralbereich homogene und blickwinkelabhängige rampenförmige Verläufe und für komplexere Darstellungen 3D-Modelle von Wolken.

Allgemein werden komplexere Szenarien durch 3D-Modelle dargestellt. Im Rahmen von PhySIG werden solche 3D-Landschaften mit einem kommerziellen Tool-Set der Firma OKTAL-SE [4] erstellt. Durch Verwendung dieses international verbreiteten und allgemein verfügbaren Tool-Sets wird die Austauschbarkeit zwischen verschiedenen Industriefirmen, Instituten und öffentlichen Auftraggebern auch auf internationaler Ebene gewährleistet. Ein weiterer Vorteil in der Verwendung dieses Tool-Sets besteht darin, dass es durch den öffentlichen Auftraggeber als validiert betrachtet wird und damit für die Durchführung von Leistungsnachweisen und Verifikationen anerkannt ist.

Das Szenarienbeschreibungsformat ist bekannt und dokumentiert, und damit ist die Voraussetzung für die Einbettung in die eigenständige Simulationsumgebung PhySIG erfüllt.

Der grundlegende Ablauf zur Erstellung eines Hintergrundszenarios bis hin zum Pixel-Bild mit Strahldichtewerten, der sogenannten Radiance Map, lässt sich unabhängig von den Tools von OKTAL SE wie folgt beschreiben:

Auf einer Weltkarte wird festgelegt, an welchem Ort eine Simulation statt finden soll. Dazu werden neben der Höhe über NN auch Breitengrad und Längengrad definiert. Anschließend werden Datum und Uhrzeit vorgegeben. Für eine Simulation im infraroten Spektralbereich unter freiem Himmel ist die Berücksichtigung von Wetterdaten entscheidend. Daher werden Jahreszeit, Sonnenstand, Wetterbedingungen wie Bewölkung, Regen und vor allem ein Tagestemperatur-Verlauf für PhySIG festgelegt, der mehrere Zeitpunkte in der Vergangenheit bis zum Simulationszeitpunkt berücksichtigt und in die Berechnungen einbezieht. Die Einstellungen für das hier eingesetzte Atmosphärenmodell MODTRAN [1] werden entsprechend festgelegt. Von diesen Einstellungen ist auch das Zielmodell (siehe Abschnitt 2.3) betroffen.

Zunächst werden die Wetterbedingungen festgelegt. Anschließend wird die Geometrie durch Polygone beschrieben, die zusammengefügt als 3D-Modell, das Terrain und das Landschaftsmodell festlegen. Es können bei PhySIG Gelände mit großer Ausdehnung dargestellt werden. Dabei kann der Detaillierungsgrad lokal stark unterschiedlich gewählt werden.

Nach der Beschreibung der Geometrie durch Eckpunkte, Kanten und Facetten, müssen diese mit Materialien belegt werden, die später eine Simulation im infraroten Spektralbereich ermöglichen. Die Materialdaten enthalten Informationen, wie z.B. die Emissivitäten. Dazu werden einzelne oder mehrere Facetten mit den genannten Materialdaten verknüpft, so dass für den später in Kapitel 3 erläuterten Rendering-Prozess mittels einer Grafikbeschleunigerhardware auf diese Daten zugegriffen werden kann.

Die Temperaturbelegung der einzelnen Facetten der Hintergrundgeometrie wird in einem weiteren Schritt unter Berücksichtigung von Jahres-, Tageszeit und des

Wetters, sowie des Temperaturverlaufs ermittelt. Hierbei werden sowohl die Wärmeleitung als auch der Strahlungsaustausch berücksichtigt.

Im nächsten Schritt erfolgt das Einbinden von Geometrien für Zielmodelle wie Boden- und Luftfahrzeuge in die Hintergrundgeometrie mit korrekter Positionierung und Orientierung in Bezug auf deren Höhenprofil. Hinzu kommt das Festlegen einer Bewegungsbahn für die Zielmodelle.

Schließlich wird, wie in Kapitel 3 beschrieben, ein Pixel-Bild berechnet, bei dem jedes Pixel einen Strahldichtewert enthält. Dieses Bild entspricht den Strahldichtewerten vor der Optik eines Suchers, der mit seiner optischen Achse auf das Hintergrundszenario und den darin enthaltenen Zielobjekten zeigt.

In BILD 1 ist exemplarisch ein Ausschnitt aus einem Hintergrundszenario im sichtbaren und im infraroten Spektralbereich von $8\ \mu\text{m}$ - $12\ \mu\text{m}$ dargestellt. Beide Bilder basieren auf demselben Datensatz.

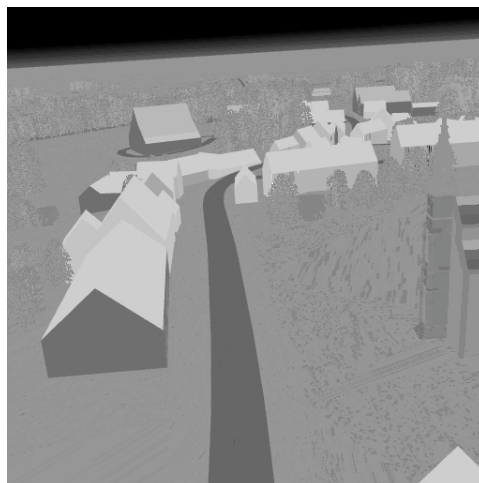


BILD 1. Beispiel eines Hintergrundszenarios im sichtbaren und IR-Bereich ($8\ \mu\text{m}$ - $12\ \mu\text{m}$)

Die Software der Firma OKTAL SE [4] greift an verschiedenen Stellen in diesen beschriebenen Workflow ein und bietet eine interaktive Möglichkeit, die für die Simulationen im infraroten Spektralbereich wichtigen Parameter wie die Wetterbedingungen oder das Temperaturprofil zu modifizieren. In den nachfolgenden Simulationsläufen kann dann dasselbe Szenarium unter anderen Wetterbedingungen oder bei anderen Tageszeiten erzeugt und betrachtet werden.

Das Simulationssystem PhySIG arbeitet mit texturierten Oberflächen, d.h. innerhalb einer Facette wird eine Struktur simuliert, die zeigt, dass eine einzelne Facette nicht nur mit einer Temperatur versehen wurde. Stattdessen kann einer Facette ein Temperatur-Profil aus verschiedenen Temperatur-Werten zugewiesen werden, die zu einem detaillierterem und damit realistischeren Pixel-Bild führen.

2.2. Atmosphäre

Die Atmosphäre wirkt sich bei der Simulation der aerokinetischen Aufheizung von bewegten Objekten auf deren Temperatur und durch die Abbremsung durch die Luftreibung auf den Bewegungszustand aus. Weiter beeinflusst die Atmosphäre die Infrarot-Strahlung des Hintergrunds und der anderen Objekte.

In PhySIG wird zur Darstellung der atmosphärischen Strahlungseffekte MODTRAN [1] eingesetzt. Hierzu werden aus den Ergebnissen von MODTRAN-Läufen Datensätze für die Generierung von Parametern einer Interpolationstabelle oder für Interpolationsformeln abgeleitet. Eine bewährte Approximationsformel zur schnellen Berechnung der atmosphärischen Transmission ist die folgende Näherungsformel :

$$(1) \quad \tau(R, H) = \exp \left\{ -a_1(H) \cdot \frac{R^{a_4(H)}}{V} \right\} \cdot \exp \left\{ -a_2(H) \cdot R^{a_3(H)} \right\}$$

mit

$\tau(R, H)$: atmosphärische Transmission
R	: Range [km]
H	: Höhe [km]
V	: Visibility [km]
$a_1(H), a_2(H), a_3(H), a_4(H)$: Parameter ermittelt mit MODTRAN

Die Parameter $a_i(H)$ der Gleichung (1) werden aus den Ergebnissen von MODTRAN-Läufen durch ein parametrisches Schätzverfahren bestimmt. Diese Parameter sind für schwarze Strahler und selektive Strahler, z.B. den Abgasstrahl eines Triebwerks unterschiedlich. BILD 2 zeigt die sehr gute Übereinstimmung zwischen den Werten aus MODTRAN und den aus der Approximationsformel Gl. (1) gewonnenen Ergebnissen für die Zelle eines Luftfahrzeuges.

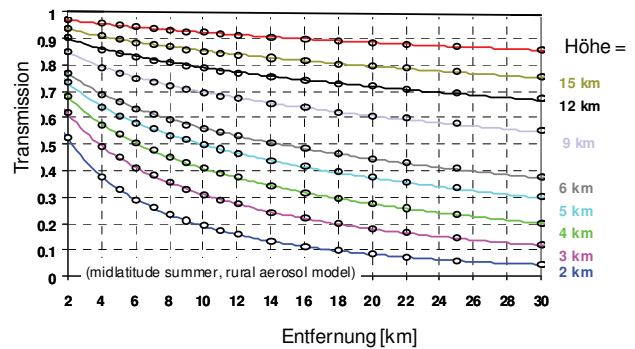


BILD 2. Vergleich der atmosphärischen Transmission zwischen MODTRAN und der Approximationsformel. Die Kreissymbole stellen die MODTRAN-Ergebnisse dar, die Kurven wurden aus Gl. (1) gewonnen.

2.3. Objektdarstellung

Die Objektdarstellung erfolgt in PhySIG durch Facettenmodelle, d.h. durch Modelle, deren Oberfläche durch Polygone repräsentiert wird. Dabei werden die physikalischen Eigenschaften wie Material, Farbe, Emissivität usw. diesen Oberflächenelementen als Eigenschaft zugewiesen. Bei der Temperaturbelegung der Facetten werden unter anderem die aerokinetische Aufheizung und Einflüsse von internen Wärmequellen berücksichtigt:

$$(2) \quad T_{Fac} = T_U \cdot (1 + 0.2 \cdot r \cdot M^2) + T_I \quad \text{mit :}$$

T_{Fac} : Temperatur der Facette [K]

T_U : Umgebungstemperatur [K]

r : Recoveryfaktor im Bereich [0..1]

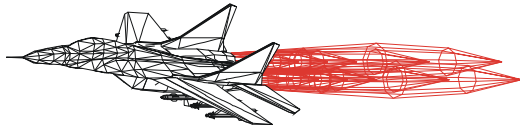
M : Machzahl

T_I : Temperaturanteil von internen Wärmequellen [K]

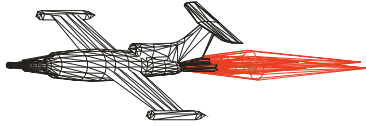
PhySIG bietet die Möglichkeit, bei Luftfahrzeugen mit luftatmenden Triebwerken, die teilweise mit Nachbrennern ausgestattet sind, die Änderung des Triebwerkszustandes zu simulieren. Eine Änderung des Triebwerkszustands führt in der Regel zu einer deutlichen Änderung der Größe und Intensität der Abgasfahne als auch der Temperatur des Triebwerkes des Luftfahrzeuges. Die durch das Abgas von Landfahrzeugen wie Panzern erzeugte Wärmeschleppung kann durch PhySIG ebenfalls realitätsnah wiedergegeben werden.

Bei propellergetriebenen Luftfahrzeugen, kann die Propeller- und Rotorbewegung sowie deren bewegungsbedingte Aufheizung dargestellt werden.

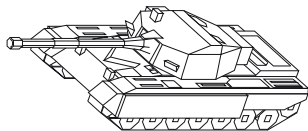
In BILD 3 sind exemplarisch die Facettenmodelle von zwei Luftfahrzeugen mit Abgasfahne und ein Landfahrzeug dargestellt.



Facettenmodell einer MiG-29 mit Abgasfahnen



Facettenmodell einer Zieldarstellungsdrohne mit Abgasfahnen



Facettenmodell eines Panzers

BILD 3. Beispiele für Facettenmodelle

2.4. Gegenmaßnahmen

Über die früher nur in der Fachwelt bekannten Gegenmaßnahmen (Flares, Chaff) wird inzwischen in den öffentlichen Medien berichtet [1]. Die simulationstechnische Darstellung von Gegenmaßnahmen ist für die Entwicklung und Leistungsbewertung von infrarotgelenkten Flugkörpern eine Grundvoraussetzung. Bei der Entwicklung von PhySIG wurde daher die Darstellung von solchen Gegenmaßnahmen berücksichtigt. Dabei werden die Kinematik, der zeitliche Intensitätsverlauf sowie die zeitabhängige Geometrie der jeweiligen Gegenmaßnahme realitätsnah dargestellt.

Die Bewegung eines Flares lässt sich durch die folgende Differentialgleichung beschreiben:

$$(3) \quad \frac{d}{dt}(m\vec{v}) = -\frac{1}{2}\rho_L \cdot c_w \cdot A \cdot \left| \frac{d\vec{r}}{dt} \right| \cdot \frac{d\vec{r}}{dt} + m \cdot \vec{g}$$

mit:

\vec{r} : Ortsvektor [m]

t : Zeit [s]

\vec{v} : Geschwindigkeit [m/s]

ρ_L : Luftdichte [kg / m³]

c_w : Luftwiderstandsbeiwert des Flares

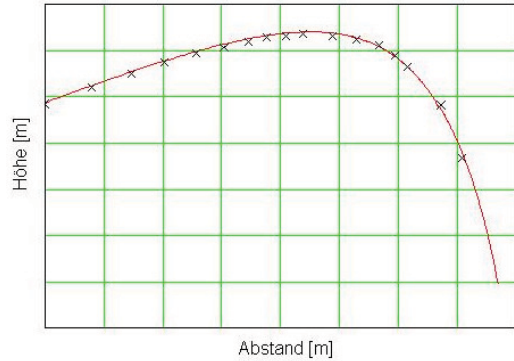
A : zeitabhängige effektive Fläche des Flares [m²]

\vec{g} : Vektor der Erdbeschleunigung [m / s²]

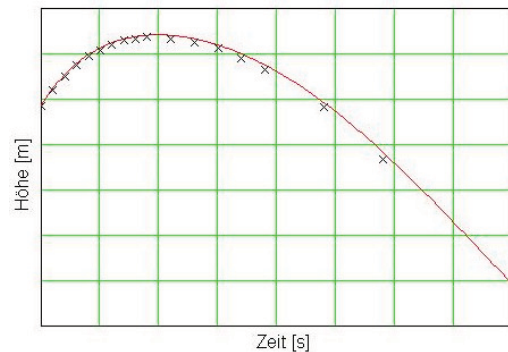
m : Masse als Funktion der Zeit [kg]

Bei der praktischen Umsetzung und zur Validierung mit Messdaten ist die folgende Approximation sinnvoll:

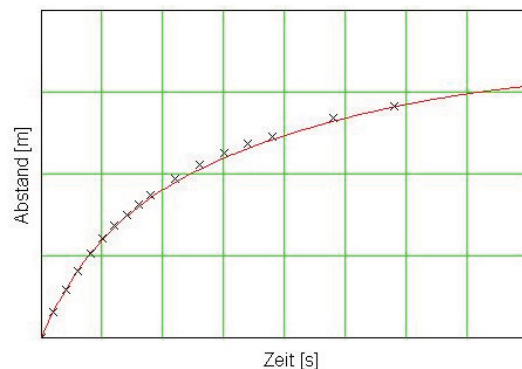
$$(4) \quad \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = -\frac{1}{2}\rho_L \cdot \sum_{i=1}^n a_i(t-t_0)^i \cdot \left| \frac{d\vec{r}}{dt} \right| \cdot \frac{d\vec{r}}{dt} + \vec{g}$$



Flarehöhe als Funktion des Abstands vom Dispenser



Flarehöhe als Funktion der Zeit



Flareabstand vom Dispenser als Funktion der Zeit

BILD 4. Vergleich zwischen gemessenen Flarepositionen (markierte Punkte) und einer simulierten Flare-bahn

Die Koeffizienten a_i können durch theoretische Analysen oder aus gemessenen Bahndaten abgeleitet werden.

Die Lösung der Bewegungsgleichung (4) erfolgt numerisch für jeden Simulationszeitschritt. In BILD 4 ist die gute Übereinstimmung einer simulierten Flarebahn mit gemessenen Flarepositionen anhand der Flarehöhe als Funktion des Abstands vom Flaredispenser, die Flarehöhe als Funktion der Zeit und der Flareabstand vom Dispenser als Funktion der Zeit dargestellt.

In BILD 5 sind exemplarisch die von PhySIG berechneten Radiance Maps im Spektralband von 3 μ m - 5 μ m aus einer Bildsequenz, basierend auf einem Szenarium mit

einem Kampflugzeug im Seitenaspekt, das Flarebursts ausstößt, dargestellt. Es ist eine Falschfarbendarstellung gewählt worden, um den hohen Dynamikbereich von Zielstruktur, Abgasfahne und Flares abdecken zu können. Blaue Bereiche in den Bildern entsprechen hierbei niedrigen Strahldichtewerten von kalten Objekten und vom Hintergrund, rote Bereiche repräsentieren mittlere Strahldichtewerte, also warme Objekte und die Farbe gelb gibt hohe Strahldichtewerte wieder.

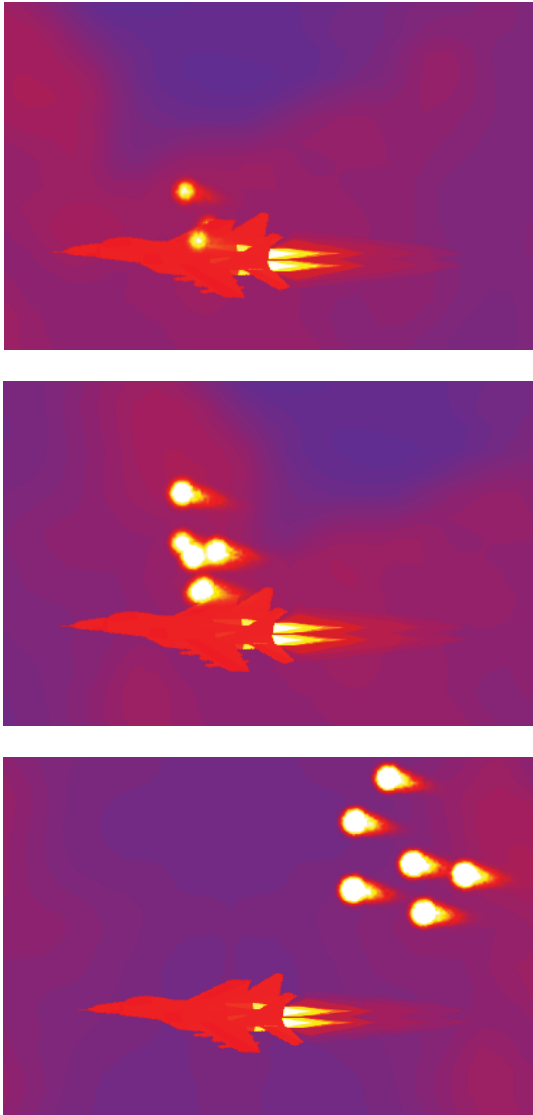


BILD 5. Beispiel einer Radiance Map mit einem Kampflugzeug im Seitenaspekt und Ausstoß von Flarebursts zu verschiedenen Zeitpunkten (Spektralband $3\ \mu\text{m} - 5\ \mu\text{m}$).

Im gewählten Beispiel in BILD 5 werden die Flares, wie bei einigen Flugzeugtypen üblich, in die obere Hemisphäre ausgestoßen, damit sich das zu schützende Ziel in der Front- und Hintenansicht hinter oder vor einer Flarewolke verbergen kann.

2.5. Sonstige Effekte

Sowohl Luftfahrzeuge als auch Bodenfahrzeuge setzen u.a. Laser zur Entfernungbestimmung und zum Stören

von Infrarotsensoren ein. PhySIG bietet deshalb die Möglichkeit, derartige gerichtete Störstrahlung zu simulieren.

Bei der Simulation eines Luftfahrzeuges über einer Wasseroberfläche in geringer Höhe wird die Spiegelung des Objekts und seiner Abgasfahne an der Wasseroberfläche durch PhySIG wiedergegeben.

Für Zieldarstellungen in Schussversuchen werden häufig kleine Drohnen mit Infrarotsignaturverstärkern in Form von Beleuchtungsflares eingesetzt. Derartige Flares zeigen in der Regel eine sehr unregelmäßige IR-Signatur und IR-Geometrie durch die Separation von Flarefragmenten oder Plasmawolken. PhySIG ist in der Lage, ein derartiges Abbrandverhalten korrekt wiederzugeben.

2.6. Erweiterung um Sensorsimulation

Basierend auf der durch PhySIG erzeugten Radiance Map erfolgt eine Simulation des Sensors. Diese Simulation berücksichtigt u.a. Einflüsse durch die optischen Komponenten, den Detektor und die detektornah Elektronik. So wird die aerokinetische Domauflheizung durch die Lösung der Wärmeleitungsgleichung in jedem Simulationszeitschritt berücksichtigt. Die sich daraus ergebende Veränderung der Transmissions- und Emissionseigenschaften des Dommaterials werden bei der Darstellung der Domstrahlung berücksichtigt.

Die Transmission und Emission weiterer optischer Komponenten, wie Linsen, Filter und Spiegel werden ebenfalls berücksichtigt. Der optische Streukreis und seine Ortsabhängigkeit gehen in die Simulation ein. Scanner und Effekte anderer mechanisch beweglicher optischer Teilbaugruppen werden im Detail berücksichtigt. Durch Streulicht und interne Reflektionen hervorgerufene Scheinstrukturen werden realitätsnah abgebildet.

Das Detektorverhalten wird durch die Berücksichtigung der Empfindlichkeit, der Inhomogenität, des Rauschens, des Offsets und des Gains wiedergegeben. Mögliche Detektorausfälle durch die Bestrahlung mit gerichteter Energie werden ebenfalls realitätsnah simuliert.

3. DARSTELLUNG DES SZENARIUM

Die Erzeugung einer Radiance Map aus dem 3D-Szenarium kann im Rahmen von PhySIG durch einen Raytracer oder durch ein Scanline-Verfahren (Render to texture mit OpenGL) erfolgen. Hierbei müssen für die Erzeugung der Radiance Map die Temperaturen der Objekte im Szenarium in Strahldichten umgerechnet werden. Dies geschieht mit Hilfe des Planck'schen Gesetzes [3]. Die Strahldichte $L(T)$ eines schwarzen Körpers in Richtung der Oberflächennormalen ergibt sich mit der spektralen Strahldichte $L_\lambda(T)$

$$(5) \quad L_\lambda(T) = \frac{1}{\pi} \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot (e^{c_2/\lambda T} - 1)}$$

aus der Formel

$$(6) \quad L(T) = \int_{\lambda_u}^{\lambda_o} L_{\lambda}(T) d\lambda.$$

Dabei sind

$c \approx 2.9979246 \cdot 10^{10}$	Lichtgeschwindigkeit $[cm/s]$
$h \approx 6.62606896133 \cdot 10^{-34}$	Planck'sche Konstante $[Ws^2]$
$k_B \approx 1.380650424 \cdot 10^{-23}$	Boltzmann - Konstante $[Ws/K]$
$c_1 = 2\pi \cdot h \cdot c^2 \approx 3.741832 \cdot 10^4$	$[W\mu m^4/cm^2]$
$c_2 = \frac{c \cdot h}{k_B} = 1.438786 \cdot 10^4$	$[\mu mK]$
λ_u, λ_o	untere und obere Grenze des Wellenlängenintervalls

Da der schwarze Körper ein Lambert'scher Strahler ist, schwächt sich diese spektrale Strahldichte mit dem Faktor $\cos \delta$ ab, wobei δ der Winkel zwischen Strahlungsrichtung und Flächennormale ist. Reale Körper sind in der Regel keine idealen schwarzen Strahler. Dies wird in physikalisch basierten Modellen durch eine spektrale Emissivität und durch eine richtungsabhängige Korrektur des Lambert'schen Strahlungsgesetzes berücksichtigt. PhySIG ermöglicht die Verwendung beliebiger allgemeiner richtungsabhängiger Abstrahlungscharakteristika.

Zur Beschleunigung der Berechnungen wird durch die Verwendung moderner Grafikkarten auf Hardwarebausteine neuester Technologie zurückgegriffen. Die Implementierung der Algorithmen zur Simulation der Transmission der Atmosphäre erfolgt dabei ebenfalls durch Verwendung von Grafikkartenbausteinen. Zur Abdeckung des in Infrarotszenarien vorkommenden sehr großen Dynamikumfangs ist der Einsatz neuester Grafikkartentechnologie mit mindestens 32-Bit-Float-Rechnung bei PhySIG notwendig.

Die Verwendung der Hardwarebeschleuniger ermöglicht den Einsatz von PhySIG in Echtzeitsimulationen.

4. VALIDIERUNG

Viele Objekte zur Zieldarstellung wurden im Rahmen verschiedener Projekte (z.B. IRIS-T, IRIS-T SL) erstellt und validiert. PhySIG bietet die Möglichkeit, diese validierten Facettenmodelle in Kombination mit den validierten Hintergrundszenerien des OKTAL SE-Tool-Sets [4] und den MODTRAN-basierten Atmosphärenmodellen darzustellen. Damit garantiert PhySIG einen international anerkannten Validierungsstatus im Rahmen von IR-Simulationen.

5. EINBINDUNG IN GESAMTSIMULATION

Ein wesentliches Merkmal von PhySIG ist neben seinem Einsatz im Stand-Alone-Betrieb zur Offline-Generierung von Bildsequenzen seine Verwendbarkeit in der geschlossenen Lenk- und Regelschleife einer Gesamtflugkörpersystems simulation (BILD 6).

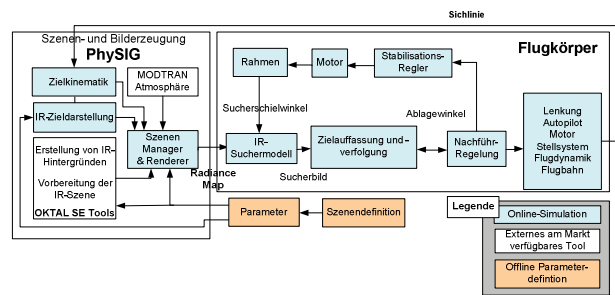


BILD 6. Einbindung der Szenen- und Bildgenerierung
PhySIG in eine Gesamtflugkörpersimulation

Die Szenendefinition erfolgt über Parameterdateien der OKTAL SE-Tools, Parameterdateien zur Beschreibung zusätzlicher Zielmodelle und anderer Objekte, sowie Parameterdateien zur Beschreibung der atmosphärischen Bedingungen. Die Hintergründe werden mit der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Vorgehensweise erstellt und die Temperaturen der einzelnen Elemente berechnet. Die IR-Zieldarstellung wird über weitere Parameterdateien festgelegt. Die Strahlungscharakteristik wird in der eigentlichen online Closed-Loop-Simulation in jedem Simulationszeitschritt an die aktuellen Gegebenheiten angepasst. Hierzu gehören auch die laufende Berücksichtigung der Aufheizung der Struktur des Zieles, wie in Gl. (2) beschrieben und der Wechsel des Betriebszustandes des Triebwerks und damit die Temperatur und die Größe der Abgasfahne.

Die Zielkinematik und der Zielaspekt werden ebenfalls fortlaufend mit jedem Simulationszeitschritt angepasst. Die atmosphärische Transmission wird zunächst für den gesamten Simulationslauf durch die Festlegung der Klima- und Wetterparameter vordefiniert und anschließend mit jedem Simulationsschritt für den aktuellen Zielaspekt und die aktuelle Zielentfernung, sowie für die Hintergrundobjekte neu berechnet. Dies kann mit Hilfe der Näherungsformel Gl. (1) erfolgen oder durch die Interpolation in den von MODTRAN ausgegebenen Tabellen.

Die Erstellung der Radiance Map erfolgt mit den in Kapitel 3 beschriebenen Methoden unter Berücksichtigung der aktuellen Flugkörper-, Ziel- und sonstigen Szenarien- und Atmosphärenparametern mit jedem Simulationszeitschritt neu. Die erstellte Radiance Map wird an das Modell des IR-Suchers weitergegeben. Dieses Modell liefert ein synthetisches Suchkopfbild, dass alle für die nachfolgende Bildverarbeitung relevanten Effekte beinhaltet (siehe Abschnitt 2.6).

Das synthetische Sucherbild wird anschließend von den Zielauffass- und Zielverfolgungsalgorithmen analysiert und die Zielablage extrahiert. Hierbei wird die Implementierung der Algorithmen in der Regel durch die tatsächliche operationelle Software des Flugkörpers im Simulationsmodell repräsentiert. Die ermittelten Zielablagen werden zum einen an die Nachführregelung und Suchkopfstabilisierung weitergegeben, so dass die optische Achse des Suchers auf das Ziel ausgerichtet werden kann. Zum anderen werden aus den Zielablagen inertielle Sichtliniendrehraten abgeleitet, aus denen die Lenkung Querschleunigungen errechnet, die der Autopilot über entsprechende Kommandos an das Stellsystem der Ruder umsetzt. Hierdurch werden die Flugkörperdynamik, die Flugkörperposition und damit die

Sichtlinie zum Ziel und Szenarium in jedem Simulationszeitschritt neu gesetzt und in der Bilderzeugung entsprechend berücksichtigt.

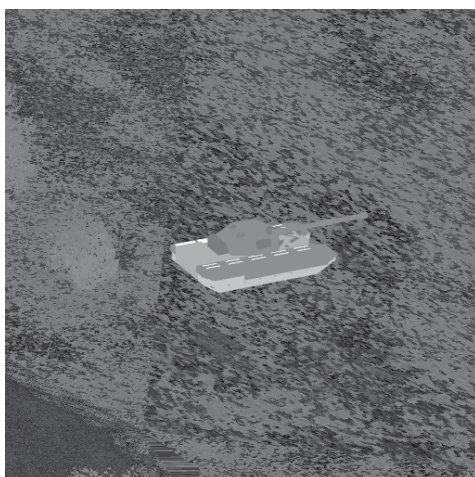
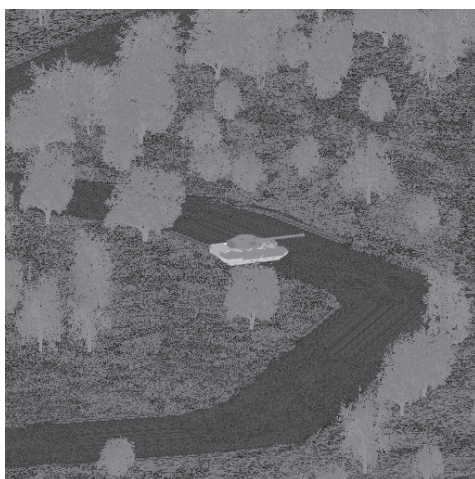
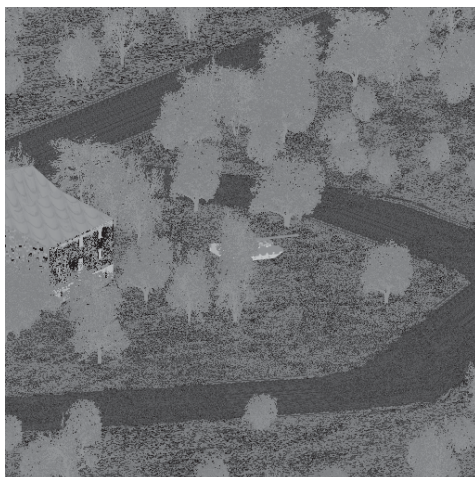


BILD 7. Folge von Radiance Maps aus einer Schusssimulation gegen ein Landfahrzeug (Spektralband $8\ \mu\text{m}$ - $12\ \mu\text{m}$).

Die zuvor dargestellte Simulationstechnik wird durch Einbindung von Hardwarekomponenten zu einer Hardware-In-the-Loop Simulation erweitert. Im einfachsten Fall wird hierbei die Bildverarbeitungs-

elektronik eines Flugkörpers mit in die Gesamtsimulation eingebunden, d.h. die Implementierung der Zielauffass- und Zielverfolgungsalgorithmen wird zusammen mit der Prozessorelektronik, dem Bildverarbeitungscomputer oder Bildverarbeitungsrechner, in der Simulation in Echtzeit betrieben. Man spricht in diesem Fall von einer Computer-In-the-Loop oder CIL-Simulation. Die Bildgenerierung muss hier die Radiance Map mit der von der eingebundenen Hardware benötigten Datenrate erstellen. In der eigentlichen Hardware-In-the-Loop (HIL) Simulation werden weitere, auch mechanisch bewegliche Hardwarekomponenten eingebunden, wie z. B. ein vollständiges Lenk- und Steuerteil oder ein vollständiger Suchkopf. Der Photonenfluss des Infrarotszenariums wird nun durch einen Infrarot-Szenarioprojektor in Echtzeit erzeugt. Die Bewegung des Szenariums relativ zum Sucher und die Bewegung des Suchers relativ zum Szenarium erfolgen über einen 5-Achsdrehtisch, wobei die inneren drei Rahmen die rotatorische Suchkopfbewegung simulieren und die äußeren beiden Rahmen die Relativbewegung des Szenarium übernehmen. Auch in dieser Simulationstechnik hat sich das PhysIG Tool-Set seit Jahren bewährt. In BILD 7 ist eine Folge von Radiance Maps im Spektralband von $8\ \mu\text{m}$ bis $12\ \mu\text{m}$ dargestellt, die aus einer Gesamtflugkörpersimulation mit Bildgenerierung extrahiert wurden. Das Zielobjekt ist beim Flugkörperstart durch einen Baum teilverdeckt und bewegt sich im Verlauf des Schusses aus der Verdeckung.

6. AUSBLICK

Diehl-BGT-Defence (DBD) kann auf langjährige Erfahrungen im Bereich der IR-Suchkopf- sowie Gesamtflugkörpersimulation zurückgreifen. Diese Erfahrungen fließen in die Anforderungen und in das Design von PhysIG ein.

Um in Zukunft flexibel auf die schnell verändernden Anforderungen der Auftraggeber reagieren zu können, hat sich DBD deshalb für die Entwicklung einer Szenen- und Bildgenerierung (PhysIG), die auf anerkannten Standards basiert, entschieden. Aufgrund der gewählten Standards ist eine Austauschbarkeit der Szenarien mit nationalen und internationalen Auftraggebern und Kooperationspartnern gewährleistet. Auf dieser Basis wird PhysIG weiter ausgebaut werden.

7. LITERATUR

- [1] MODTRAN – MODerate spectral resolution atmospheric TRANsmittance algorithm and computer model, developed by US Airforce Research Laboratories/VSBT in collaboration with Spectral Sciences, Inc.
The code is distributed by Ontar Corporation.
- [2] SPIEGEL-Online, Kanzlermaschine warf Magnesium und Stanniolpapier ab, 10. Mai 2002.
- [3] The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook, Volume 1, Sources of Radiation, J. S. Accetta, D. L. Shumaker, Infrared Information Analysis Center, Environmental Research Institute of Michigan, 1993.
- [4] OKTAL SE-Workbench, <http://www.oktal-se.fr>.