

# EINSATZ VON ECHTZEITSIMULATION UND MATHEMATISCH DIGITALER SIMULATION IN ENTWICKLUNG UND NACHWEIS VON LENKFLUGKÖRPERSYSTEMEN

P. Schätz

p.schaetz@lfk.eads.net

EADS/LFK Lenkflugkoerpersysteme GmbH  
85716 Unterschleissheim, Landshuter Str. 26  
Germany

## 1. ÜBERSICHT

Mit der wachsenden Leistungsfähigkeit von Computersystemen hat sich der Stellenwert von Simulationen für den Entwicklungs- und Nachweisprozess von Lenkflugkörpersystemen geändert. Besonders vor dem Hintergrund eines wachsenden Kostendrucks und der Forderung nach kürzeren Entwicklungszeiten haben sich die Bedeutung und das Anwendungsgebiet der Mathematisch Digitalen Simulation (MDS) und der Hardware-in-the-Loop-Simulation (HIL) vergrößert.

Anhand von Beispielen aus den Projekten PARS3-LR und Taurus KEPD350 werden die Erfahrungen beim Einsatz der MDS und der HIL im Entwicklungs- und Nachweisprozess aufgezeigt. Es werden verschiedene Simulationskonfigurationen sowohl im Nichtechtzeit- als auch im Echtzeitbereich erklärt und bzgl. ihres Beitrags zu einem effizienten Entwicklungs- und Nachweisprozess eines Lenkflugkörpersystems bewertet. Auf der Basis dieser Analyse werden Best-Practice-Regeln angegeben.

Das Paper schließt mit einem Ausblick auf die weitere Entwicklung der MDS und HIL im Rahmen des Entwicklungs- und Nachweisprozesses von Lenkflugkörpersystemen.

## 2. EINFÜHRUNG

In den letzten 10 Jahren hat die wachsende Komplexität moderner Lenkflugkörpersysteme und die Forderung nach Kostenreduktion und kürzeren Entwicklungszeiten eine Änderung des Entwicklungsprozesses verursacht. Eine Lösung dieser Herausforderungen war das Konzept des virtuellen Prototypen, das eine Erstellung des kompletten Systems auf einem Computer vorsieht, um eine Verbesserung der System- und Subsystemspezifikation und die Entwicklung einer ersten Version für Flug-führungs- und Bildverarbeitungsalgorithmen zum Ziel hat noch lange bevor der erste reale Prototyp existiert. Das Konzept wurde aus anderen industriellen Bereichen übernommen, wie z.B. der Automobil- und Flugzeugindustrie, in denen dieses Konzept schon weit vorangetrieben wurde und seine erwarteten Vorteile bereits nachweisen konnte.

Das Konzept des virtuellen Prototyps weist der Simulation eines Lenkflugköpers eine bedeutende Rolle zu. Seine Anwendung wurde nur durch die fortschreitende Zunahme der Computerleistungen möglich. Die Leistung von PCs hat in den letzten 10 Jahren um mehr als eine Größenordnung zugenommen. Gleichzeitig wurden auch bedeutende Fortschritte im Bereich der Software-Technologien gemacht. Dies hat zum heutigen Status geführt, indem Anwendungen, die hohe Rechenleistungen benötigen, auf Low-Cost-Computern ausgeführt werden können, was wiederum die Voraussetzung für den breiten Einsatz von High-Fidelity-Simulationen von Lenkflugkörpersystemen ist.

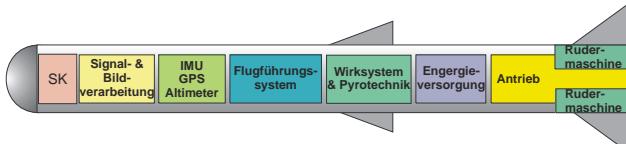
Die beschriebene Zunahme der Rechenleistung von Computern hat außerdem Hardware-in-the-Loop-Simulationen ebenso verbessert. Damit sind High-Fidelity-Simulationen von Lenkflugkörpersystemen in Echtzeit sogar unter Einbeziehung der Bildverarbeitung möglich.

Außer der Reduktion der Entwicklungszeit und der Kosten ist die Qualität der Entwicklung von großer Bedeutung. Dies betrifft sowohl die Qualität des Systems als auch die Qualität des Leistungsnachweises. High-Fidelity-Simulationen unterstützen die Steigerung der Qualität des Systems, erlauben aber auch eine qualitative Steigerung des Leistungsnachweises. Mit Hilfe von Simulationen können Systemanforderungen nachgewiesen werden, die durch Versuche aus Kostengründen, wegen der nicht realisierbaren Versuchsbedingungen oder aus anderen Gründen nicht erbracht werden können. So ist es z.B. nicht einfach die Systemleistung für vorgegebene Wetterbedingungen nachzuweisen, da die Zeitplanung im Normalfall das Warten auf das Auftreten entsprechender Wetterbedingungen nicht erlaubt. Es gibt weitere Bedingungen, die Versuche überhaupt nicht zulassen, z.B. die Bekämpfung eines Ziels in einer Stadt durch einen Stand-Off-Flugkörper. Diese Versuchsbedingungen können durch Simulationen gut realisiert werden und liefern zudem eine bessere Einsicht in das Systemverhalten, da mit Monte-Carlo-Simulationen zusätzlich eine größere Bandbreite an Versuchsbedingungen untersucht werden kann.

Der oben beschriebene Fortschritt in der Simulations-technologie hatte einen signifikanten Einfluss auf den Entwicklungsprozess von Lenkflugkörpern. In diesem Paper wird die Entwicklung der MDS und der HIL-Simulation bis zum gegenwärtigen Status aufgezeigt. Es ist nicht schwer den weiteren Entwicklungsgang von FK-Simulationen auf der Basis des beobachteten Trends vorherzusagen. Und es ist auch nicht gewagt vorherzusagen, dass die Bedeutung der Simulationen für den Entwicklungsprozess weiter zunehmen wird. Am Ende dieses Papers werden ein Verfahren und die dazu benötigten Werkzeuge beschrieben, die eine weitere Optimierung des Entwicklungsprozesses hinsichtlich einer Verkürzung der Entwicklungszeit und einer Reduktion der Kosten ermöglichen.

### 3. SYSTEMSIMULATIONEN

BILD 3-1 zeigt ein typisches Lenkflugkörpersystem mit seinen wichtigsten Komponenten. Diese umfassen den Suchkopf (IR oder Radar), die Signal- und Bildverarbeitung, Sensorik für die Navigation, Lenkung und Regelung, den Flugführungsrechner, das Wirkssystem und schließlich Energieversorgung, Antrieb und Stellsystem. Diese Komponenten sind für die Systemsimulationen zu modellieren, wobei oftmals eine Modellierung von Wirkssystem und Energieversorgung für die geplanten Untersuchungen nicht erforderlich ist. Im unteren Teil der Abbildung ist das Zusammenwirken der modellierten Komponenten dargestellt, wobei als zusätzlich zu modellierende Systembestandteile die Strukturdynamik und Aeromechanik mit aufgenommen wurden. Hierbei werden die zwei zugrunde liegenden Regelschleifen, die Flugzustandsregelschleife und die äußere Lenkschleife deutlich. Ziel der Simulationen ist es, das dynamische Verhalten dieses Systems in seinem Umfeld dem Simulationszweck entsprechend mit ausreichend hoher Genauigkeit wiederzugeben.



**BILD 3-1 Lenkflugkörpersystem**

Sind alle Komponenten als mathematisch digitale Modelle auf einem Simulationsrechner vorhanden, so wird die Simulation als Mathematisch Digitale Simulation (MDS) bezeichnet. Werden einzelne Komponenten des realen Systems als Hardware mit der dazugehörigen operationellen Software in die Simulation eingesetzt, so spricht man von Hardware-in-the-Loop-Simulationen (HIL). Insbesondere die Einbindung des Flugführungsrechners in die Simulation (Computer-in-the-Loop-Simulation oder abgekürzt CIL) ist für die Lenkflugkörperfentwicklung von besonderer Bedeutung. Eine detail-

lierte Beschreibung dieser Simulationen, ihres Einsatzzweckes und der damit verbundenen Vor- und Nachteile erfolgt in den folgenden Kapiteln.

### 4. ERFAHRUNGEN MIT SIMULATIONEN IN VERSCHIEDENEN FK-PROJEKTEN

Um einen Überblick über die Nutzung der MDS in der Entwicklung von Lenkflugkörpern zu geben müsste man mehr als die in diesem Paper betrachtete Dekade zurückblicken. Simulationen wurden schon seit langer Zeit für Studien in der Vorbereitung von Entwicklungsprojekten auf teuren, aber vergleichsweise langsamem Computern genutzt. Die Anwendungsbereiche umfassten alle wichtigen Aspekte der FK-Entwicklung: Aerodynamik, Lenkung und Regelung, Verarbeitung von Sensorsignalen und vieles mehr. Es wurde eine Vielzahl verschiedener Simulationen durchgeführt, die jeweils auf einen der beschriebenen Bereiche fokussiert waren. Simulationen des Komplettsystems waren aufgrund der zu geringen Rechnerleistungen nur mit großen Einschränkungen möglich. Die Laufzeiten der Simulationen waren sehr lang, gleichzeitig war der Detaillierungsgrad der verwendeten Modelle gering. Daraus resultierte eine eingeschränkte Aussagekraft der Simulationsergebnisse. Damit lag der Schwerpunkt der Systemoptimierung auf Versuchen, die im Labor und auf dem Versuchsgelände durchgeführt wurden.

#### 4.1. Systemsimulationen PARS3-LR

Bei EADS/LFK änderte sich diese Situation signifikant in 1991, als aus Kostengründen eine Neuverhandlung des Vertrages zur Entwicklung des Panzerabwehraketensystems PARS3-LR erforderlich wurde. Die angestrebte Kostenreduktion konnte nur durch eine Reduktion der geplanten Flugversuche von ca. 200 auf 20 erreicht werden. Dies war nur dadurch möglich, dass ein wesentlicher Anteil am Systemleistungsnachweis, der durch diese Flugversuche hätte erbracht werden müssen, nun durch Simulationen mit der MDS ersetzt wurde. Zum ersten Mal wurde der MDS in einem großen FK-Projekt eine derart wichtige Rolle zugewiesen. Neben der Überzeugungsarbeit, die für diese Vorgehensweise sowohl auf Auftraggeberseite, als auch auf Industrieseite zu leisten war, stellte dies auch simulationstechnisch eine große Herausforderung dar, da das PARS3-LR-System eine Bildverarbeitung für die Bilder von IR-Sensoren enthält (siehe BILD 4-1). Außer einem Visier mit einem IR-Sensor zur Beobachtung der Szene und zur Aufschaltung des Trackers auf das Ziel durch den Schützen, ist jeder FK mit einem IR-Suchkopf ausgestattet, der dem FK in Verbindung mit seiner Bildverarbeitung eine autonome Zielverfolgung während der Flugphase erlaubt.



**BILD 4-1 Waffensystem PARS3-LR auf TIGER**

#### **4.1.1. MDS im Projekt PARS3-LR**

Die MDS im Projekt PARS3-LR wurde für folgende Aufgaben eingesetzt:

- Auslegung des Flugzustandsreglers
- Entwicklung der Bildverarbeitungsalgorithmen
- Systemleistungsuntersuchungen
- Optimierung der Systemleistung bzgl. des Einsatzspektrums
- Vorsimulation von Versuchen
- Nachsimulation von Versuchen

Zum klassischen Einsatz der MDS zur Auslegung des Flugzustandsreglers kamen die neuen Aufgaben zur Entwicklung und Optimierung der Bildverarbeitungsalgorithmen unter Systemaspekten. Die MDS erwies sich hierbei sehr bald als wertvolles Werkzeug, das eine Optimierung der Bildverarbeitung bereits im Vorfeld von Versuchen ermöglichte. Damit konnten einige Probleme schon vor Beginn der Versuche gelöst werden. Die Versuche konnten damit gezielter auf die Untersuchung der realisierten Hardware ausgerichtet werden und mussten sich nicht zusätzlich mit Algorithmikproblemen befassen. Diese Vorgehensweise wurde durch die zunehmende Leistungsfähigkeit der eingesetzten Simulationsrechner gefördert, da sowohl die Rechenzeiten reduziert wurden, was umfangreichere Tests ermöglichte, als auch eine detailliertere Modellierung möglich wurde, die eine noch größere Realitätsnähe der Simulation zur Folge hatte. Damit bildete sich eine enge Zusammenarbeit zwischen Bildverarbeitungsentwicklung und Systemsimulation heraus, die zu kürzeren Verbesserungszyklen der Bildverarbeitungsalgorithmen führte. Der Aufbau dieser hoch detaillierten MDS hatte damit bzgl. des Entwicklungsprozesses die Erwartungen erfüllt.

Der geplante Einsatz der MDS für den Nachweis von Systemleistungen stellte die Modellierer vor besondere Herausforderungen. So musste nicht nur das Waffensystem mit hoher Genauigkeit modelliert werden, es war auch ein statistischer Satz von IR-Szenarien zu erstellen, der eine Überprüfung der Waffensystemleistungen im gesamten Einsatzspektrum erlaubte. Die Bedeutung der zu erbringenden Nachweise hatte weiter zur Folge, dass für die MDS ein umfassender Verifikations-, Validierungs- und Akkreditierungsprozess (VV&A) zu planen und durchzuführen war. Da bis zu diesem Zeitpunkt noch in keinem Lenkflugkörperprojekt die MDS für einen derartigen Leistungsnachweis eingesetzt worden war, lagen weder auf Auftraggeberseite, noch auf Industrieseite entsprechende Erfahrungen vor. Das dem Entwicklungsprozess zugrunde liegende V-Modell enthielt hierzu keine für die Praxis nutzbare Vorgaben, so dass hierfür während des Entwicklungsprozesses eine Vorgehensweise in Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber erarbeitet werden musste.

Der VV&A-Prozess für den Einsatz der MDS im Systemleistungsnachweis erwies sich als schwieriger und langwieriger Prozess, in dem die Industrie dem Auftraggeber die Realitätsnähe der synthetischen IR-Szenarien und des Waffensystemmodells nachzuweisen hatte. Insbesondere die Wahl geeigneter Validierungskriterien stellte ein Problem dar. Im Vergleich mit den Ergebnissen von Laborversuchen mit einzelnen Waffensystemkomponenten und mit Messdaten aus Feld- und Schießversuchen konnte schließlich der Nachweis erbracht werden, dass die MDS das Waffensystemverhalten mit hoher Genauigkeit wiedergibt. Damit konnte die MDS für den Statistischen Systemleistungsnachweis eingesetzt werden, in dem die geforderte Erfolgsquote des Waffensystems in einem Satz von nahezu 200 Szenarien nachgewiesen wurde.

Damit war nachgewiesen, dass diese Vorgehensweise für die Entwicklung von Lenkflugköpersystemen sowohl wirtschaftliche, als auch technische Vorteile bringt und damit zukunftsweisend ist.

#### **4.1.2. HIL im Projekt PARS3-LR**

Auch die an die HIL-Simulation gestellten Anforderungen im Projekt PARS3-LR waren groß. So stellt sich sofort die Frage, wie eine detaillierte IR-Szene im Labor für zwei IR-Sensoren simuliert werden kann. So fehlten zu diesem Zeitpunkt die heute verfügbaren IR-Projektoren. Als Lösung wurde eine beheizbare Metallplatte entwickelt, deren homogene Strahlungsabgabe durch eine davor angebrachte Folie moduliert wurde. Ein mit einem Druckverfahren auf die Folie aufgebrachtes Szenenbild ermöglichte so die näherungsweise Nachbildung einer IR-Szene.

Es zeigte sich bald, dass die mit dieser Zieltafel gegebenen Möglichkeiten zu große Einschränkungen für die tiefgehende Untersuchung der Systemleistung darstellte.

In der Folge wurde die HIL-Simulation immer mehr zum Integrationswerkzeug, während Leistungs-Untersuchungen verstärkt mit MDS und Feldversuchen durchgeführt wurden. Als Fazit lässt sich feststellen, dass die Zeit für den Einsatz der HIL-Simulation in einem Projekt mit einem bildverarbeitenden IR-System noch nicht reif war.

## 4.2. Systemsimulationen Taurus KEPD 350

Das zweite Projekt, in dem Erfahrungen mit der MDS und der HIL-Simulation im Entwicklungs- und Nachweisprozess gesammelt wurden, ist Taurus KEPD 350. Hierbei handelt es sich um einen Stand-Off-Flugkörper großer Reichweite gegen stationäre Ziele mit einem IR-Suchkopf, der während der Cruise-Phase mit dem Suchkopf aufgefassten Landmarken zur Bestimmung seiner Position nutzt (Image Based Navigation) und im Endanflug im IR-Bild einen Tracker auf das geplante Ziel aufschaltet um den Flugkörper damit ins Ziel zu lenken.

### 4.2.1. MDS im Projekt Taurus KEPD 350

Wie im Projekt PARS3-LR wurde auch in diesem Fall eine MDS entwickelt, die zur Auslegung von Flugzustands- und Lenkregelschleife eingesetzt wurde. Einen Schwerpunkt bildete hierbei die Navigationsalgorithmik, die Daten des GPS-Empfängers, des Radarhöhenmessers (Terrain Navigation) und des Bildverarbeitungscomputers (Image Based Navigation) zu fusionieren hat.

Die MDS wurde wie die operationelle Software in ADA entwickelt und erlaubt die Integration wesentlicher Teile der operationellen Software des Zentralrechners und des Navigationsrechners. Als besonders wichtig für die Entwicklungsarbeiten ist die Monte-Carlo-Fähigkeit der MDS hervorzuheben. Ein umfangreicher VV&A-Prozess führte zu einer erfolgreichen Akkreditierung der MDS, so dass diese schließlich zum Nachweis ausgewählter Systemleistungen eingesetzt werden konnte.

Im Unterschied zur MDS im Projekt PARS3-LR wurde keine Bildverarbeitung integriert. Die Bildverarbeitungsalgorithmik wurde durch Verhaltensmodelle ersetzt, deren Parameter (z.B. Trackgenauigkeit, IBN-Genauigkeiten) aus Messungen abgeleitet wurden. Wie die Erfahrungen aus dem Projekt zeigen, ist es damit im Normalfall möglich statistische Aussagen des Gesamtsystemverhaltens bzgl. der Navigation oder der Trefferverteilung mit ausreichender Genauigkeit zu erhalten. Vergleiche mit Ergebnissen der HIL-Simulation, in der die operationelle Bildverarbeitung enthalten ist, zeigen jedoch, dass die Aussagekraft der MDS bzgl. Bildverarbeitungsleistungen begrenzt ist und in einzelnen Fällen signifikante Abweichungen auftreten können. Dies ist weiter nicht überraschend, da leicht einzusehen ist, dass die Komplexität realer IR-Szenarien nicht komplett mit einigen wenigen Parametern erfasst werden kann.

Das Fehlen der Bildverarbeitungsalgorithmik in der MDS beschränkte damit die Rolle der MDS sowohl im Entwicklungs-, als auch im Nachweisprozess. Dieses Defizit musste durch den Einsatz der HIL-Simulation und durch

Versuche ausgeglichen werden. Als Fazit lässt sich feststellen, dass die gewählte Vorgehensweise mit Blick auf eine möglichst schnelle und kostengünstige Entwicklung sicher nicht optimal war und die Erweiterung der MDS mit der Bildverarbeitungsalgorithmik eine Verbesserung dargestellt hätte.

### 4.2.2. HIL im Projekt Taurus KEPD 350

Im Unterschied zum Projekt PARS3-LR wurde im Projekt Taurus KEPD 350 eine umfangreiche HIL-Simulation aufgebaut, die in 3 Konfigurationen erstellt wurde:

- Computer-in-the-Loop (CIL)
- HIL-Simulation mit IPC (HIL-3)
- HIL-Simulation mit IPC und SIC (HIL-4)

Die CIL-Simulation enthält den Zentralrechner und den Navigationsrechner, während alle anderen Komponenten des FK-Systems und der Umwelt in Form mathematisch digitaler Modelle auf dem Simulationsrechner vorlagen. Die Modelle waren hierbei den in der MDS eingesetzten Modellen äquivalent, soweit möglich mit diesen sogar identisch. Die CIL-Simulation wurde schwerpunktmäßig zur Untersuchung des Modings und für Abgangs-Untersuchungen eingesetzt. Ferner wurde die CIL-Simulation als Messmittel für Software-Freigaben eingesetzt und hatte schließlich im Leistungsnachweis wichtige Nachweise zu erbringen. Damit war die CIL-Simulation die Basis der HIL-Simulationen und ist für eine FK-Entwicklung unverzichtbar.

Die HIL-Simulation mit IPC (HIL-3) baute auf der CIL-Simulation auf, enthielt aber zusätzlich den Bildverarbeitungsrechner und konnte daher komplette Missionen inklusive der IBN und der Zielaufschaltung im Endanflug simulieren. Hierzu wurden IR-Bilder einer synthetischen 3d-Szene in Echtzeit erzeugt, die direkt in den IPC eingespeist wurden. Die Bildgenerierung in Echtzeit erfordert sehr hohe Rechenleistungen. Eine genaue Kenntnis der Totzeit der Bildgenerierung war erforderlich, um eine realitätsnahe Simulation durchführen zu können. Im Unterschied zu normalen Zielverfolgungsalgorithmen zeigte sich die Bestimmung von 3d-Positionsinformationen aus IR-Bildern als sehr empfindlich für Abweichungen der Bildinformationen von ihren Sollwerten.

Die HIL-3 erwies sich als wertvolles Entwicklungs-Werkzeug für die Optimierung der Bildverarbeitungsalgorithmik im Rahmen des Gesamtsystems und wurde intensiv für die Vorbereitung von Flugversuchen genutzt. Auch im Systemleistungsnachweis fiel ihr u.a. durch die fehlende MDS mit Bildverarbeitungsalgorithmik eine bedeutende Rolle beim Nachweis von Bildverarbeitungsleistungen auf Systemebene zu.



**BILD 4-2 5-Achsen-Drehtisch der HIL-4-Simulation**

Die HIL-Simulation mit IPC und SIC (HIL-4) war die umfangreichste Ausbaustufe der HIL-Simulationen. Zusätzlich zum HIL-3-Aufbau wurde die SIC auf einem 5-Achsen-Drehtisch montiert (siehe BILD 4-2), so dass Untersuchungen des Systemverhaltens unter Berücksichtigung der FK-Bewegungen auf die Stabilisierung des Suchkopfes und die Inertial Measurement Unit (IMU) möglich wurden. Diese Simulation kommt einem Tragflug oder Freiflug am nächsten.

Die HIL-4-Simulation wurde alternativ zur HIL-3-Simulation eingesetzt und wies dasselbe Aufgaben-Spektrum auf. Aufgrund des etwas geringeren Aufwandes beim Betrieb der Anlage wurde der HIL-4-Aufbau schwerpunktmäßig für Untersuchungen des System-Verhaltens während der Entwicklung eingesetzt, während der HIL-4-Aufbau für die Erbringung von Nachweisen für Suchkopfleistungen und im Systemleistungsnachweis unverzichtbar war.

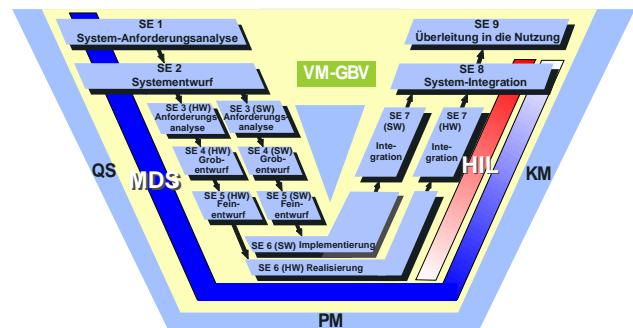
Als Fazit kann festgehalten werden, dass der Einsatz einer CIL-Simulation in einem FK-Entwicklungsprojekt unverzichtbar ist. Eine HIL-3-Simulation ist ein wertvolles Entwicklungs-Werkzeug für die Optimierung von Systemleistungen und ermöglicht eine signifikante Reduktion von Flugversuchen. Eine HIL-4-Simulation hat ihre Vorteile insbesondere im Nachweis von Leistungen auf Systemebene. Aufgrund der Komplexität der Anlage und dem Aufwand zur Durchführung von Tests wird man diesen Aufbau aber eher in größeren FK-Projekten vorsehen.

## 5. DER EINSATZ VON SIMULATIONSWERKZEUGEN IM ENTWICKLUNGSPROZESS

Anfang der 90er-Jahre waren MDS und HIL-Simulation Entwicklungswerkzeuge, die weitgehend unabhängig voneinander betrieben wurden. Dies lag auch daran, dass sie schwerpunktmäßig in verschiedenen Entwicklungsphasen eingesetzt wurden. BILD 5-1 zeigt eine schematische Darstellung des Entwicklungsprozesses gemäß V-Modell. In diesem Bild wird deutlich, dass die MDS ihren Einsatzschwerpunkt zu Beginn und im Verlaufe der Entwicklung hatte, während die HIL-Simulation naturgemäß

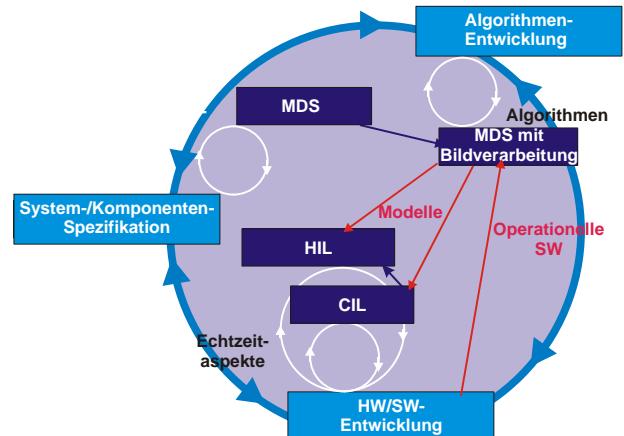
erst nach Erstellung der benötigten Hardware-Komponenten eingesetzt werden konnte und demnach erst in der Phase der Systemintegration und des Leistungsnachweises ihren Einsatzschwerpunkt hatte.

An der Verwendung der HIL-Simulation in der Endphase eines FK-Entwicklungsprojekts hat sich nichts geändert. Wie im Falle der PARS3-LR-Entwicklung in Kapitel 4.2.1 beschrieben, hat sich der Einsatz der MDS aber aufgrund der nun verfügbaren höheren Rechnerleistungen auch bis in den Bereich des Nachweises von Bildverarbeitungsleistungen auf Systemebene hinein erweitert. Damit stellen sich erstmals Fragen nach der Koordination von MDS und HIL-Simulation in Entwicklung und Nachweis, da sie zum Teil alternativ eingesetzt werden können.



**BILD 5-1 Entwicklungsprozess nach V-Modell (GBV)**

BILD 5-2 zeigt ein Konzept für den Einsatz dieser Simulationswerkzeuge, das aus den oben beschriebenen Projekterfahrungen abgeleitet wurde.



**BILD 5-2 Konzept für den Einsatz von MDS und HIL-Simulation in der FK-Entwicklung**

Hierbei nimmt die MDS weiterhin ihre traditionelle Rolle in der Analyse von Systemanforderungen und der ersten Auslegung des Systems zu Beginn der Entwicklung wahr. Damit entsteht das zu entwickelnde System zuerst auf einem Rechner und basiert auf ersten einfachen Modellen, die im weiteren Verlauf der Entwicklung detailliert werden. Ein wichtiger Punkt für die Nutzung der MDS zur Optimierung einzelner Komponenten und des Systems ist die weitgehende Integration operationeller Software (z.B. der Bildverarbeitungs-Software) in die

MDS. Diese Integration sollte nach Möglichkeit ohne zeitaufwändige Software-Änderungen erfolgen, um den Zyklus einer Software-Optimierung möglichst kurz zu halten und so die Entwicklung insgesamt zu beschleunigen. Die Simulation des Systemeinsatzes in synthetischen 3d-Szenarien erlaubt eine tiefgehende Untersuchung des Systemverhaltens noch lange vor dem Beginn von Feldversuchen. Ein weiterer wichtiger Punkt betrifft die in der MDS eingesetzten Modelle: Sie sollten von Anfang an so spezifiziert und entwickelt werden, dass ihre spätere Verwendung in der HIL-Simulation unter Echtzeitbedingungen möglich ist. Dies reduziert nicht nur den Aufwand der Modellerstellung insgesamt, sondern auch den Aufwand des VV&A-Prozesses, in dem auch die Äquivalenz der Systemrepräsentation durch MDS und HIL nachzuweisen ist. Außerdem wird hierdurch der Umfang der Untersuchungen reduziert, falls Differenzen von Simulationsergebnissen der MDS und HIL-Simulation beobachtet werden.

Ein optimaler Prozess für die Entwicklung der Simulationswerkzeuge liegt vor, wenn die HIL-Simulation die natürliche Weiterentwicklung der MDS darstellt. Im Idealfall ist nur eine Integration einer Hardware-Komponente (z.B. Flugführungsrechner) in die MDS vorzunehmen, d.h. dass ein entsprechendes Interface zur Hardware-Komponente in den Simulationsrechner zu integrieren ist. Eine sukzessive Integration verschiedener Hardware-Komponenten führt zu den zu erstellenden HIL-Konfigurationen. Welche Konfigurationen benötigt werden, kann nicht allgemein angegeben werden, sondern richtet sich nach dem übergeordneten Entwicklungs- und Nachweiskonzept, in dem außer MDS und HIL-Simulationen auch Labor-, Tragflug- und Freiflugversuche berücksichtigt werden.

Im Unterschied zur MDS liegt der Untersuchungsschwerpunkt der HIL-Simulation beim Echtzeitverhalten des Systems und seiner Komponenten und weniger im Bereich der Optimierung der Algorithmik. Im Rahmen des Nachweiskonzepts ist jedoch festzulegen, welche Nachweise mit welchem Simulationswerkzeug zu erbringen sind. Aufgrund des geringeren Betriebsaufwandes sind i.a. Leistungen, die nicht signifikant von Echtzeiteffekten abhängen, effizienter mit der MDS zu erbringen. Diese Beurteilung kann aber nur in Abstimmung mit dem Auftraggeber durchgeführt werden, um eine entsprechende Akzeptanz zu erhalten. Erfahrungsgemäß ist eine Akzeptanz oftmals leichter für HIL-Simulationen zu erhalten, als für die MDS. Für die Planung der Entwicklung und des Nachweises ist es in jedem Fall wesentlich, diese Abstimmung des Nachweiskonzeptes frühzeitig, d.h. zu Beginn der Entwicklung, durchzuführen. Ansonsten erlauben die bestehenden Unsicherheiten keine optimale Planung und Durchführung der Entwicklung und des Nachweises.

## 6. STATUS DER SIMULATIONSWERKZEUGE BEI EADS/LFK

Die in den letzten 15 Jahren in verschiedenen FK-Entwicklungsprojekten gemachten Erfahrungen waren Auslöser für verschiedene Aktivitäten zur Weiterentwicklung der Simulationswerkzeuge bei EADS/LFK mit dem Ziel den im vorhergehenden Kapitel beschriebenen optimierten Prozess für den Einsatz von MDS und HIL-Simulation zu verwirklichen. Diese Aktivitäten umfassen Folgendes:

- Entwicklung eines virtuellen Testgeländes
- Entwicklung einer IR-Bildgenerierung
- Effiziente Modellerstellung
- HIL-Simulation als Ausbaustufe der MDS

Der erfolgreiche Einsatz der MDS im Projekt PARS3-LR mit intensiver Nutzung synthetischer 3d-Szenarien hat die Zielsetzung erzeugt, in Zukunft einen Satz von realitätsnahen, synthetischen 3d-Szenarien zur Verfügung zu haben, die eine Auslegung und Optimierung von Bildverarbeitungsalgorithmen, IR-Suchköpfen, Navigationsalgorithmen etc. auf effiziente Weise lange vor Realisierung der Hardware ermöglichen. Hierfür sind Modellierungs werkzeuge zu erstellen, die aufgrund des für kommerzielle Anbieter vernachlässigbar kleinen Marktes wehrtechnischer IR-Anwendungen kaum verfügbar sind. Die Erstellung von Modellen ist hierbei sehr stark an die verwendete Bildgenerier-Software gekoppelt, für die ein noch stärker eingeschränktes kommerzielles Angebot besteht. Insbesondere nationale Interessen verhindern bisher einen verbreiteten Einsatz bestehender Werkzeuge. Dies hat zum Beschluss geführt, bei EADS/LFK eigene Werkzeuge zu entwickeln, die dem Einsatzzweck angepasst werden können und die bei kommerziellen Werkzeugen festgestellten Einschränkungen nicht aufweisen. So wurde ein kommerzielles Modellierungswerkzeug für IR-Anwendungen erweitert und eine Software (THERMOS) zur Berechnung der Temperaturverteilungen komplexer Szenen entwickelt und validiert. Weiter wurde eine hochgenaue IR-Bildgenerierung auf der Basis der Ray-Tracer-Technologie erstellt, die in Nicht-Echtzeit-Anwendungen eingesetzt wird. Ergänzend wird derzeit an der Entwicklung einer echtzeitfähigen Bildgenerier-Software gearbeitet, die zukünftig MDS-Anwendungen beschleunigen und in HIL-Simulationen eingesetzt werden soll. Damit ist die Realisierung der Zielsetzung des virtuellen Testgeländes deutlich näher gerückt. Weiter erlaubt die IR-Bildgenerierung den Einsatz der MDS in Bereichen, die bisher nicht zugänglich waren und die in Kapitel 7 näher beschrieben werden.

Das optimierte Einsatzkonzept für MDS und HIL-Simulation enthält auch eine effizientere Modellerstellung. Diese basiert auf der bereits länger genutzten Entwicklungsumgebung Simulink zur Auslegung der Regler eines FK. Mit der in neuerer Zeit weiter entwickelten Autocoding-Funktion können einzelne Modelle des mit Simulink erstellten Systemmodells für den Einsatz in der MDS und

HIL-Simulation nutzbar gemacht werden. Dies führt nicht nur zu einer weiteren Integration der genutzten Entwicklungs- und Simulationsumgebungen, sondern auch zu einer Effizienzsteigerung bzgl. der Modellerstellung. Auch die Erstellung der operationellen Software kann von dieser Vorgehensweise profitieren, da eine Erstellung operationeller Regler-Software damit möglich wird. Auch diese kann, wie im Konzept in Kapitel 5 gefordert, wiederum in die MDS und HIL-Simulation übernommen werden. Diese Vorgehensweise wurde noch nicht realisiert, wird aber im Vorfeld größerer Entwicklungsprojekte untersucht und nutzbar gemacht.

Die Entstehung einer HIL-Simulation als Ausbaustufe der MDS erfordert die Berücksichtigung von HIL-Anforderungen bei der Erstellung der MDS. In bisherigen Projekten wurde die Übernahme von MDS-Modellen in HIL-Simulationen bereits erfolgreich praktiziert, der Simulationsrahmen für diese Modelle war aber bisher immer unterschiedlich und nur auf die jeweilige Simulation ausgerichtet. Diese Vorgehensweise wurde damit bisher nicht mit allen Konsequenzen umgesetzt. Es sind jedoch keine prinzipiellen Probleme zu erkennen, die eine derartige Vorgehensweise in Frage stellen.

## 7. NUTZUNG DER MDS FÜR OPERATIONELLE STUDIEN, TRAINING UND ÜBERGEORDNETE SYSTEMSIMULATIONEN

Während die HIL-Simulation auch weiterhin auf ihre entwicklungsspezifischen Aufgaben beschränkt bleibt, erweitert sich das Anwendungsgebiet der MDS durch die beschriebene Weiterentwicklung substantiell. Bisher konnte die MDS im beschriebenen Umfang für die FK-Entwicklung genutzt werden. Die MDS mit Bildverarbeitung, die durch höhere Rechnerleistungen möglich wurde, und insbesondere die echtzeitfähige IR-Bildgenerierung erschließen der MDS nun ein neues Anwendungsgebiet außerhalb der Entwicklung. Ihrem Einsatzziel entsprechend repräsentiert die MDS das reale FK-System mit hoher Genauigkeit, was durch den VV&A-Prozess nachgewiesen wird. Dementsprechend ist die MDS geradezu prädestiniert für einen Einsatz als Trainingssimulator und operationelle Studien.

Der Operateur des FK-Systems kann damit den Einsatz des Systems unter den verschiedensten Bedingungen üben, wobei die Kosten für einen „Schuss auf dem Rechner“ verglichen mit einem realen Schießversuch geradezu vernachlässigbar sind. Außerdem kann damit auch unter Einsatzbedingungen geübt werden, die in der Praxis überhaupt nicht realisierbar wären, wie z.B. der Einsatz eines Stand-Off-FK gegen ein Bodenziel in städtischem Umfeld. Voraussetzung für diese Anwendung der MDS ist in den meisten Fällen eine Echtzeitfähigkeit, zumindest aber die Fähigkeit dem Operateur als quasi echtzeitfähig (Pseudo-Echtzeit) zu erscheinen. Eine bedeutende Rolle kommt in diesem Zusammenhang wiederum der IR-Bildgenerierung zu, die in den meisten Fällen die größten

Probleme bzgl. der Echtzeitfähigkeit der MDS aufwirft. Die derzeitige Entwicklung auf diesem Gebiet zeigt jedoch, dass diese Probleme nur vorübergehend bestehen und in absehbarer Zeit Lösungen verfügbar sein werden, die einen Einsatz der MDS in Trainingssimulatoren möglich machen.

Operationelle Studien, die eine Untersuchung des Einsatzes von FK-Systemen unter verschiedenen Randbedingungen zum Ziel haben, wurden bisher mit Modellen durchgeführt, die im Vergleich mit den oben beschriebenen MDS vereinfacht waren und im Rahmen von Monte-Carlo-Simulationen eingesetzt werden konnten. Diese vereinfachten Modelle wurden mit Daten aus Versuchen oder detaillierteren Simulationen parametrisiert, um das statistische Verhalten des Originalsystems korrekt wiederzugeben. Eine Parametrierung bedeutet meistens Vereinfachung, womit die Gefahr verbunden ist, das Systemverhalten für spezielle Bedingungen nicht korrekt vorherzusagen. Der Einsatz einer validierten MDS bringt den Vorteil auch für ungewöhnliche Einsatzbedingungen des Systems korrekte Ergebnisse zu erhalten. Die Verwendung einer hochdetaillierten MDS auf diesem Gebiet scheiterte bisher am hohen Rechenzeitbedarf, der Monte-Carlo-Simulationen in vielen Fällen praktisch unmöglich machte. Insbesondere gilt dies für die Simulation von Systemen mit IR-Bildverarbeitung. Auch in diesem Fall liefert die Steigerung der Rechnerleistungen und die Entwicklung einer echtzeitfähigen IR-Bildgenerierung die Basis für den Einsatz der detaillierten MDS in Monte-Carlo-Studien. Dies wird die Ergebnisse operationeller Studien nicht nur bzgl. des Einsatzspektrums des Systems erweitern, es wird auch zu einer qualitativen Verbesserung der Ergebnisse führen und die Studienergebnisse noch näher an die Realität heranführen.

Ein zusätzliches Anwendungsgebiet für die MDS beginnt sich derzeit erst abzuzeichnen: der Einsatz im Rahmen der Simulation eines Systems von Systemen. Insbesondere die angestrebte Vernetzung von Systemen im operationellen Einsatz verlangt aufgrund der Komplexität nach entsprechenden Simulationen. Derartige Simulationen waren in der Vergangenheit aufgrund der verfügbaren Rechnerleistungen nur eingeschränkt möglich. In Zukunft wird die Kopplung detaillierter Systemsimulationen in einer Simulationsumgebung aufgrund der derzeitigen Entwicklungen der Simulationstechnologien möglich werden. Dies führt in eine neue Dimension der Simulationen – das virtuelle Gefechtsfeld. Dieses besteht außer einem realitätsnahen 3d-Szenario aus verschiedenen Repräsentanten realer Systeme, die sich in diesem Szenario realitätsnah, d.h. in diesem Zusammenhang intelligent, verhalten. Diese Simulationen können Erkenntnisse über den Einsatz der realen Systeme erbringen, die in dieser Qualität bisher nur aus echten Gefechtsübungen gewonnen werden können.

Eine weitere Steigerung der Simulationen wird durch die Einbindung realer Systeme in diese Simulationen mög-

lich. Spätestens an diesem Punkt spielt die Echtzeitfähigkeit der Simulationen eine entscheidende Rolle und steigert die Anforderungen an die teilnehmenden Simulationen. Der Gewinn aus solchen Simulationen wäre jedoch enorm: Es wären nicht nur neue Erkenntnisse bzgl. eines optimalen Einsatzes von Systemen, es würde sich auch die Möglichkeit bieten die Besatzungen und Operatoren von teilnehmenden realen Systemen in diesem virtuellen Gefechtsfeld zu schulen und dies unter Einsatzbedingungen, die bisher nicht oder nur mit hohem Aufwand realisierbar waren.

## 8. ZUSAMMENFASSUNG

Am Beispiel der FK-Entwicklungsprojekte PARS3-LR und Taurus KEPD350 wurde gezeigt, dass aufgrund der inzwischen verfügbaren hohen Rechenleistungen die Simulation bildverarbeitender IR-Systeme in Nichtezeit und Echtzeit eine wichtige Rolle bei der Auslegung und Entwicklung dieser Systeme einnimmt und neben einer besseren Systemoptimierung auch eine Kostenreduktion und Verkürzung der Entwicklungszeit ermöglicht. Auch der Einsatz der Simulationen zum Nachweis von Systemleistungen, die durch Versuche nicht oder nur mit hohem Aufwand nachweisbar wären, wurde erfolgreich durchgeführt.

Es wurde ferner ein Konzept aufgezeigt, das in einem Entwicklungsprojekt ein optimiertes Zusammenwirken von Software-Entwicklung, MDS und HIL-Simulation ermöglicht.

Schließlich wurde dargestellt, dass sich durch die derzeitigen Fortschritte bei den Rechenleistungen und der Simulationstechnologie neue Anwendungsgebiete für die MDS ergeben. So zeichnet sich ein Einsatz detaillierter Simulationen im Bereich operationeller Studien ab. Aber auch eine Verwendung der MDS in System-of-Systems-Simulationen verspricht einen neuen Erkenntnisgewinn. Ein weiteres Anwendungsgebiet für die MDS stellen Simulatoren dar, die durch größere Realitätsnähe eine qualitative Steigerung der Schulung an bildverarbeitenden IR-Systemen versprechen.

## 9. ABKÜRZUNGEN

CIL	Computer-in-the-Loop
FK	Flugkörper
GPS	Global Positioning System
HIL	Hardware-in-the-Loop
IBN	Image Based Navigation
IMU	Inertial Measurement Unit
IPC	Image Processing Computer
IR	Infrared
KEPD350	Kinetic Energy Penetrator Destroyer 350
MDS	Mathematisch Digitale Simulation

PARS3-LR	Panzerabwehrsystem 3. Generation Lange Reichweite
PC	Personal Computer
SIC	Stabilized Infrared Camera
VV&A	Verification, Validation & Accreditation

## 10. REFERENZEN

keine