

# KONTINUIERLICHE SYSTEMSIMULATIONSUNTERSTÜTZUNG IM FLUGZEUGENTWICKLUNGSPROZESS ANHAND EINES BRENNSTOFFZELLENSYSTEMS

R. Langermann, P. Vörsmann  
EADS CRC, Institut für Luft- und Raumfahrtssysteme  
Nesspriel 1, 21129 Hamburg, Hermann-Blenk-Str. 23, 38108 Braunschweig  
Germany

## 1. ÜBERSICHT

Die Brennstoffzellentechnologie nimmt stetig an Bedeutung für industrielle und private Anwendungen zu. In den letzten Jahren wurde der mobile Einsatz von Brennstoffzellen überwiegend von der Automobilindustrie vorangetrieben. Die besonderen Vorteile der Nutzung von Brennstoffzellentechnologie an Bord von Flugzeugen liegen im Bereich der Hilfsstromerzeugung und der Staudruckturbine (RAT). Zum Beispiel erwägt Boeing die Nutzung einer Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) als Alternative zur bisherigen Hilfsstromerzeugung [1, 2].

Im 3. und 4. nationalen Luftfahrtforschungsprogramm (LUFO 3 und 4) verfolgt Airbus in verschiedenen Projekten den Ansatz, Brennstoffzellensysteme zur Wassererzeugung und elektrischen Versorgung verschiedener Systeme im Flugzeug zu nutzen.

Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist der kontinuierliche Einsatz von Simulationen während der gesamten Projektlaufzeit sinnvoll [3]. Im Folgenden wird daher zum einen ein Konzept für den Simulationseinsatz in der Systementwicklung – von der Konzeptphase bis zum kommerziellen Produkt – entwickelt. Zum anderen wird die Notwendigkeit der technischen Realisierung einer verteilten multidisziplinären Simulation anhand eines komplexen Brennstoffzellensystems zur Erzeugung von elektrischer Energie und Wasser erörtert.

## 2. EINLEITUNG

Das Prinzip der direkten Umwandlung von chemischer in elektrische Energie ohne den Umweg über die Verbrennung ist seit 1839 bekannt, als W. Grove die erste Brennstoffzelle entwickelte. Die erste Anwendung der Brennstoffzellentechnologie erfolgte in den fünfziger Jahren des letzten Jahrhunderts in der bemannten Raumfahrt [4]. Zum jetzigen Zeitpunkt wird die Entwicklung und Simulation von Brennstoffzellensystemen für den Einsatz an Bord von Flugzeugen in einer Reihe von Forschungsarbeiten vorangetrieben [5, 6]. Erste Studienergebnisse zeigen ein viel versprechendes Potenzial für die Energieversorgung kommerzieller

Flugzeuge. Aufgrund dieses Potenzials werden Projekte zur Nutzung von Brennstoffzellensystemen in zukünftigen Flugzeugen staatlich gefördert. Derzeitig wird pneumatische, hydraulische und elektrische Energie für Bordsysteme und Klimaanlage von den Triebwerken bereitgestellt [7]. In zukünftigen Flugzeugen könnte diese Versorgung von Brennstoffzellensystemen übernommen werden. Der für das Brennstoffzellensystem benötigte Wasserstoff wird dabei durch einen Reformierungsprozess unter Verwendung von Kohlenwasserstoff (Jet A Fuel) gewonnen. Neben der Energiegewinnung liefert die Brennstoffzelle über die Oxidation des Wasserstoffs Wasser. Dieses Wasser kann in das Bordnetz zurückgespeist werden, wodurch sich das Abfluggewicht reduziert lässt. Zusätzlich werden Schadstoff- und Geräuschemission reduziert.

Um das Potenzial der Brennstoffzellentechnologie an Bord von Flugzeugen zu erforschen, entwickelt das EADS Corporate Research Centre (CRC) eine Brennstoffzellensystemsimulation. Das Simulationsmodell wird wiederum anhand von Labormessungen verifiziert. Ein weiteres Ziel der Simulation besteht in der virtuellen Integration der Flugzeugverbraucher und der virtuellen Abbildung der Wassererzeugung an Bord, um so einen sinnvollen Einsatz der Brennstoffzellentechnologie zu gewährleisten.

Aus Gründen der Sicherheit, der Wirtschaftlichkeit und zur Vermeidung von Hardwareschäden können bestimmte kritische Systemzustände nicht anhand von Laborversuchen untersucht werden. Aus diesem Grund werden Überlastfälle, Schadensszenarien und andere Zustände simuliert. Für den Einsatz eines Brennstoffzellensystems an Bord eines Flugzeuges ist es unerlässlich, auch die Flugzeugumgebungsbedingungen mit einzubeziehen. Das Simulationsmodell wird während des Einsatzes kontinuierlich angepasst, da es im gesamten Systementwicklungsprozess verwendet werden soll.

## 3. SIMULATION IM ENTWICKLUNGSPROZESS

Simulationen werden heute in nahezu allen technischen Bereichen eingesetzt. Die wichtigsten Gründe dafür liegen in der Verbesserung der

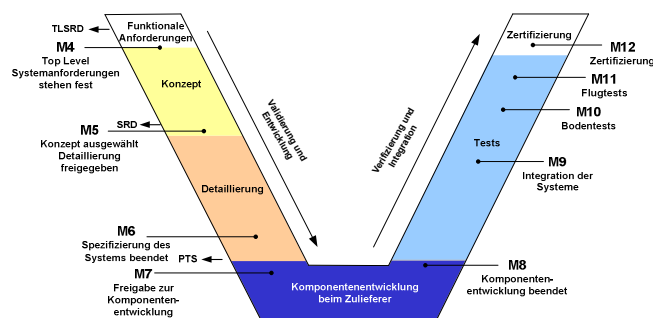
Entscheidungssicherheit und -qualität. So wird die Systemsimulation schon jetzt in frühen Entwicklungsphasen genutzt, doch auch die Anwendung während der gesamten Entwicklungszeit ist aus wirtschaftlichen Gründen anzuraten. Je komplexer ein System dabei ist, desto mehr ist der Einsatz von Simulationen gerechtfertigt [8].

Für nahezu alle technischen Einsatzbereiche gibt es heute spezifische Simulationsprogramme. Trotzdem ist die Wiederverwendbarkeit von Modellen noch nicht gegeben, da diese für genau eine spezielle Anwendung entwickelt werden [9]. Zudem werden die Modelle immer komplexer und müssen auch immer häufiger disziplinübergreifend eingesetzt werden können. Diese Anforderungen können jedoch nicht mit spezialisierten Simulationsprogrammen umgesetzt werden, so dass Simulationssoftwarehersteller dazu übergegangen sind, Schnittstellen zu verschiedenen Programmen zur Verfügung zu stellen, um die Stärken der individuellen Programme gezielt zu kombinieren.

In den letzten Jahren kamen zu den spezialisierten Programmen multidisziplinäre Simulationsprogramme hinzu. Diese sind nicht auf einen physikalischen Bereich begrenzt, sondern auch für die Modellierung und Simulation heterogener physikalischer Systeme geeignet [10].

### 3.1. Flugzeugentwicklungsprozess

Die Entwicklung von Flugzeugsystemen wird nach der Methode des V-Modells durchgeführt [11]. Dieses Modell ermöglicht ein standardisiertes Vorgehen in der Entwicklung komplexer Systeme. Der Entwicklungsprozess wird hierbei in zwei Phasen eingeteilt. Auf dem linken V-Modell-Schenkel befinden sich die Spezifizierung und Validierung und auf dem rechten die Integration und Verifizierung (siehe BILD 1) [12].



**BILD 1 V-Modell für die Flugzeugsystementwicklung**

Die High-Level-Anforderungen werden in der Systemspezifikation differenziert. Dieser iterative Prozess wird so lange wiederholt, bis die technische Spezifikation der einzelnen Systemkomponente

erreicht wird. Das bedeutet, dass das System in Subsysteme unterteilt wird, welche unabhängig voneinander entwickelt werden. In den Phasen der Implementierung und Integration (rechter Schenkel) wiederum werden die Entwicklungsschritte in umgekehrter Reihenfolge durchlaufen (Bottom up).

In BILD 1 sind das V-Modell für den Flugzeugentwicklungsprozess und die wichtigsten Meilensteine (M) dargestellt. Die Vorteile des V-Modells sind:

- Minimierung von Entwicklungsrisiken
- Erhöhung der Qualität
- Senkung von Entwicklungskosten
- Verbesserung der Kommunikation

Der zentrale Aspekt des V-Modells ist die Validierung und Verifizierung (V&V) in jedem Entwicklungsschritt. Doch eine Integration aller Systemkomponenten wird erst in der finalen Implementation vorgenommen (M11 Flugtest), so dass Systeminkompatibilitäten erst sehr spät im Entwicklungsprozess entdeckt werden, was zu zeit- und kostenintensiven Wiederholungen von Entwicklungsschritten führt.

#### 3.1.1. Simulation in der Systementwicklung

Um einen Überblick über das Potenzial der Simulation im Bereich der Flugzeugentwicklung zu geben, werden die Vor- und Nachteile der Nutzung im Folgenden gegenübergestellt (siehe TAB 1).

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhung der Entscheidungsqualität</li> <li>• Kosteneffektive Systemanalyse</li> <li>• Sichere Analyse von kritischen Systemzuständen</li> <li>• Schnelle Änderung von Parametern</li> <li>• Flexible Nutzung als analytisches Modell</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zeitintensive Modellierung</li> <li>• Problem der V&amp;V des Modells</li> <li>• Optimierte Lösung kann nicht gewährleistet werden</li> </ul>

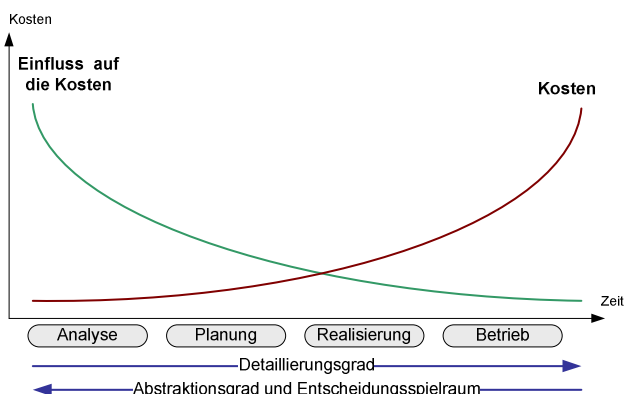
**TAB 1 Vor- und Nachteile des Simulationseinsatzes [13]**

Grundsätzlich sollte die Simulation nur mit vorhandenem Fachwissen, sorgfältiger Planung und zum richtigen Zeitpunkt eingesetzt werden. Klassische Entwicklungsprozesse sind gekennzeichnet durch den Einsatz von Simulationen

in späten Entwicklungsphasen. In den frühen Phasen basiert die Entwicklung auf empirischem Wissen, wodurch besonders neue Systementwicklungen aufgrund fehlender Erfahrungen ein hohes Risikopotenzial bergen. Der durchgängige Einsatz der Simulation ist in klassischen Entwicklungsprozessen jedoch laut Albers nicht vorgesehen [14].

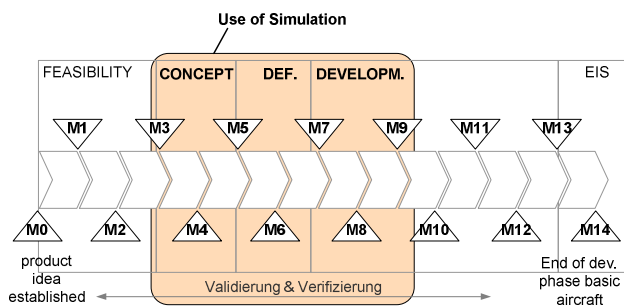
In der Entwicklung sind Zeit, Kosten und Qualität eng verbunden. So bedeutet eine kürzere Entwicklungszeit oft eine Minderung der Qualität. Zeitlich gesehen werden in den ersten fünf Prozent des Entwicklungsprozesses siebzig Prozent der Kosten festgelegt. Kurzfristig steigt der Aufwand beim Einsatz der Simulation, doch mittelfristig reduziert die Simulation die Iterationsschritte (siehe V-Modell), erhöht das System-Know-How und reduziert Entwicklungszeit und -kosten.

Dabei ist der Zeitpunkt für den Einsatz von hoher Bedeutung. Wie aus BILD 2 ersichtlich, ist der Einfluss von Simulationen zu Beginn des Entwicklungsprozesses hoch, während die Kosten für die Simulation gering sind. Aus diesem Grund ist der frühe Einsatz anzuraten [15]. Doch auch die durchgängige Nutzung von Simulationen ist im Entwicklungsprozess gerechtfertigt [3].



**BILD 2 Einfluss der Simulation auf die Kosten**

Der Einsatz von Simulationen im Entwicklungsprozess wird in diversen Airbus-Verfahrensanweisungen beschrieben. Obwohl der Einsatz empfohlen wird, gibt es jedoch keine standardisierten Vorgehensweisen, wie die Simulation zur Unterstützung verwendet werden soll.



**BILD 3 Simulation im Airbus Entwicklungsprozess**

In BILD 3 ist der Airbus-Meilensteinplan dargestellt. Darin wird der Einsatz von Simulation von der Definition des Grundkonzeptes (M3) bis zur Flugzeugmontage (M9) empfohlen.

Zusammengefasst bedeutet dies, dass es kein standardisiertes Vorgehen zum Simulationseinsatz in der Flugzeugsystementwicklung gibt, sondern nur allgemeine Verfahrensanweisungen, welche die Prozesse beschreiben, dabei aber auf keine konkrete Realisierung für hochkomplexe Systeme eingehen.

### 3.2. Schwächen des Entwicklungsprozesses

In Kapitel 3.1 wurde auf die Schwächen des derzeitigen Entwicklungsprozesses eingegangen. Der beschriebene Prozess weist drei zentrale Schwachpunkte auf: Zum einen gibt es keine durchgängige Unterstützung durch Simulationen im Entwicklungsprozess, so dass diese in frühen Entwicklungsphasen (Definierung des Konzeptes) nicht eingesetzt werden, obwohl sie dort zur Reduktion von Entwicklungszeit und -kosten führen würden. Zum anderen kommt es aufgrund von fehlender Abstimmung zu Verzögerungen. Außerdem werden multidisziplinäre Schnittstellen nicht einbezogen, so dass eine fehlende Interoperabilität erst in späten Integrationsphasen entdeckt wird und somit kosten- und zeitintensive Iterationsschritte erforderlich sind. In der Analyse des Systementwicklungsprozesses zeigten sich die folgenden Schwächen.

#### Schwachpunkt 1: Ungenügende Simulationsunterstützung in den frühen Entwicklungsphasen

- Keine Entscheidungsunterstützung durch Simulationsergebnisse in der Konzeptphase
- Frühe Konzeptentscheidungen nur auf Basis früherer Entwicklungen
- Niedrige Innovationslevel in der Konzeptphase
- Keine Konzeptoptimierung

Zurzeit werden nur wenige Simulationsmodelle zwischen verschiedenen Abteilungen ausgetauscht. Die Wiederverwendbarkeit von Modellen ist somit eingeschränkt, so dass diese in verschiedenen Abteilungen mehrfach entwickelt werden.

#### Schwachpunkt 2: Prozessverzögerungen aufgrund fehlender Zusammenarbeit

- Verzögerungen durch fehlende Informationen
- Ungenügender Modellaustausch

Die Entwicklung eines Flugzeugsystems ist ein interdisziplinärer Prozess mit Schnittstellen zu diversen anderen Systemen. Zurzeit werden Systemüberschneidungen jedoch in der

Spezifikationsphase nicht adressiert (siehe Kapitel 3.1). Spezifische Simulationen werden für einzelne Anwendungen genutzt, so dass Systeme nur unabhängig voneinander simuliert werden. Die Systemkompatibilität wird erst im Integrationstest geprüft. Eine Gesamtsystemsimulation existiert derzeit nicht.

Schwachpunkt 3: Systemüberschneidungen werden nicht adressiert

- Systemüberschneidungen werden erst in späten Prozessphasen überprüft
- Kosten- und zeitintensive Iterationsschritte

Für eine kontinuierliche Simulationsunterstützung ist ein Datenmanagement unabdingbar. Derzeitig werden verschiedene Datenmanagementsysteme verwendet, wodurch der administrative Aufwand, um Datenauffindbarkeit und Aktualität zu gewährleisten, sehr hoch ist.

Schwachpunkt 4: Ungenügender Austausch von Daten, Modellen und Informationen

- Verwendung geschätzter Daten
- Ungenügende Weitergabe von Simulationsdaten (Wissensverlust)
- Isolierte Anwendungen (Entwicklung innerhalb einzelner Abteilungen)
- Eingeschränkte Wiederverwendbarkeit von Modellen
- Ungenügende Informationsqualität
- Inkonsistenz von Modellen und Daten

Schwachpunkt 5: Fehlende systemübergreifende Datenorganisation und -weitergabe

- Ungeregelter Datenaustausch
- Vielzahl an Datenbanken und Managementsystemen
- Unterschiedliche Zugriffsrechte
- Holschuld

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es kein Standardverfahren für die Simulationsunterstützung im Flugzeugentwicklungsprozess gibt.

**3.3. Konzept für die durchgängige Simulationsunterstützung im Entwicklungsprozess**

Die Anforderungen an eine durchgängige Unterstützung durch Simulation sind aus der Schwachpunktanalyse ersichtlich. Der Einsatz von Simulationen im gesamten Entwicklungsprozess hängt vom Informationsmanagement ab. Aus diesem Grund werden die Anforderungen in zwei Bereiche geteilt (siehe TAB 2).

Prozess	Informationsmanagement
1. Simulationsunterstützung in der Konzeptphase	4. Verstärkter Datenaustausch
2. Parallelisierung der Aktivitäten	5. Verstärkter Modellaustausch
3. Untersuchung der Systemüberschneidungen	6. Systemübergreifende Organisation des Informationsmanagements
7. Gewährleistung der Umsetzbarkeit	

**TAB 2 Konzeptanforderungen**

1. Simulationsunterstützung in der Konzeptphase

Wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, hat der Einsatz von Simulation in den frühen Entwicklungsphasen einen immensen Einfluss. So können auch zum Scheitern verurteilte Konzepte schon früh als solche identifiziert werden, wodurch kosten- und zeitintensive Iterationsschritte vermieden werden.

2. Parallelisierung der Aktivitäten

Durch die Detaillierung des Modells können Prüfeinrichtungen gleichzeitig vorbereitet und entwickelt werden.

3. Untersuchung der Systemüberschneidungen

Die virtuelle Untersuchung von Systemüberschneidungen zwischen den Meilensteinen M4 und M6 beschleunigt die Integrationstests, so dass große Iterationsschritte vermieden werden können.

4. Verstärkter Datenaustausch

Prozessinformationen sollten zeitnah zur Verfügung gestellt werden, damit Missverständnissen und dem Gebrauch nicht mehr aktueller Daten vorgebeugt wird.

5. Verstärkter Modellaustausch

Die Wiederverwendung bestehender Modelle senkt die Entwicklungskosten. Eine Anforderung für den Modellaustausch stellt dabei eine standardisierte Schnittstelle dar.

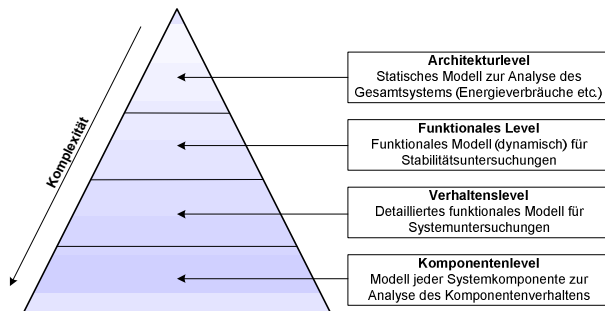
6. Systemübergreifende Organisation des Informationsmanagements

Es ist von großer Bedeutung, dass alle eingebundenen Teilnehmer Zugang zu den bereitgestellten Informationen haben. Ein Informations-Overhead sollte dabei jedoch vermieden werden.

Hinzu kommt, dass grundsätzlich die Vorteile des Konzeptes den Aufwand rechtfertigen sollten (7. Gewährleistung der Umsetzbarkeit).

### 3.3.1. Prozessunterstützung durch den Einsatz von Simulation

Die Prozessanforderungen (siehe TAB 2) können durch den Einsatz der Simulation erfüllt werden. Eine kontinuierliche Unterstützung während des gesamten Entwicklungsprozesses kann über verschiedene Modellabstraktionsgrade umgesetzt werden (siehe BILD 4). In der Konzeptphase werden grobe Modelle verwendet. Die ersten Systemkenntnisse werden mit diesen Modellen gesammelt. Der Detaillierungsgrad der Modelle steigt während des fortlaufenden Prozesses an.



**BILD 4 Modellabstraktionsgrade**

Es ist von großer Bedeutung, dass verschiedene Abstraktionsgrade eines Modells zur Verfügung gestellt werden, die unabhängig voneinander genutzt werden können.

Eine Kombination von Stand-Alone-Simulationen und von systemübergreifender Simulation erlaubt ein angemessenes Vorgehen, in dem die Vorteile der Simulation nicht durch den Nachteil der Ressourcenbindung entwertet werden. Die verschiedenen Systemabteilungen verwenden interne Simulationen, um z.B. Konzepte zu verifizieren. So kann gewährleistet werden, dass die am besten geeignete Software verwendet wird. Zusätzlich wird die systemübergreifende Simulation durchgeführt, zum Beispiel am Ende der Konzeptphase.

Ein Vorteil dieses Ansatzes ist, dass Inkompatibilitäten schon in frühen Entwicklungsphasen entdeckt werden. Die systemübergreifende, multidisziplinäre Simulation kann in vier Kategorien eingeteilt werden (siehe TAB 3).

	1 Modell	mehrere Modelle
1 Simulator	1. Variante Modellierung und Simulation in einem multidisziplinären Werkzeug	2. Variante Getrennte Modellierung, aber Gesamtsimulation
mehrere Simulatoren	(4. Variante) (Modellseparation)	3. Variante Simulatorkopplung

**TAB 3 Varianten der multidisziplinären Simulation [16]**

### 1. Modellierung und Simulation mit einem Multidisziplinären Werkzeug

In diesem Fall wird ein einzelnes Simulationsprogramm benutzt, wodurch sich die Rechenzeit verringert und die Integration von Teilmodellen vereinfacht wird. Ein schwerwiegender Nachteil besteht jedoch in der geringen Auswahl an Simulationsprogrammen, die zu einer geringen Flexibilität der Simulation führt. Außerdem müssen alle Modelle in der gerade benutzten Modellierungs- und Simulationssprache vorliegen.

### 2. Einzelmodellierung und Gesamtsimulation

Das System wird in mehrere Teilsysteme aufgeteilt, die dann unabhängig voneinander modelliert werden. Anschließend werden die Modelle in ein Simulationsprogramm importiert und zusammen simuliert. Eine Anforderung an diese Art von Simulation ist eine standardisierte Modellaustauschnittstelle und die Möglichkeit zur Modellintegration in eine Software (Modellimport).

### 3. Simulationskopplung

Die Co-Simulation und die verteilte Simulation sind geeignet für die Simulationskopplung. Modelle können mit verschiedenen Simulationswerkzeugen entwickelt werden. Diese Simulationswerkzeuge können wiederum für eine systemübergreifende Simulation gekoppelt werden. Ein Vorteil liegt dabei in der Wiederverwendung bestehender Modelle, ein anderer in der Flexibilität der Werkzeugauswahl, so dass das jeweilig am besten geeignete Simulationsprogramm verwendet werden kann.

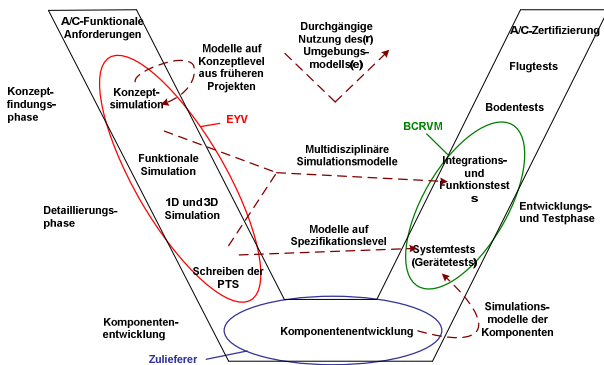
### 3.3.2. Informationsmanagement

Die Basis des Informationsmanagements besteht nicht aus einer einzelnen Datenbasis für die gesamten Informationen (Daten, Modelle, Dokumente etc.), sondern aus der Verwendung vorhandener Datenmanagementstrukturen. Der Unterschied liegt darin, dass ein Link generiert und in der zentralen Datenbank abgelegt wird, wenn Daten in der Datenbank gespeichert werden. Dieser Link schafft über die Informationsbasis einen Zugang zu den korrespondierenden Daten. Ein individueller Anwenderzugang vermeidet dabei Informationsüberfluss und informiert den Anwender über neue Daten im System. Persönliche Zugriffsrechte werden ebenso wie die Daten von einem Team überwacht (in Bezug auf Korrektheit, Vollständigkeit, Nachverfolgbarkeit usw.).

Das Informationsmanagement ermöglicht die Wiederverwendung von Modellen in den folgenden Entwicklungsphasen (siehe BILD 5):

- Modelle aus vorherigen Entwicklungen können in der Konzeptphase wieder verwendet werden

- Modelle aus M4 bis M6 können in der Entwicklung von Testeinrichtungen erneut benutzt werden
- Modelle aus Systemabteilungen und von Zulieferern können für Hardware-in-the-Loop (HIL) wieder verwendet werden

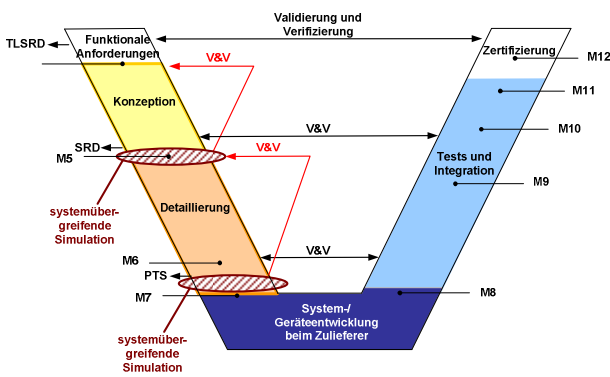


**BILD 5 Wiederverwendung von Modellen**

Die Vorteile dieses Konzeptes bestehen in der Wiederverwendung existierender Infrastruktur und der zentralen Zuweisung von Anwenderinformationen. Zusätzlich erhöht es die Entwicklungstransparenz, verbessert die Kommunikation, den Modellaustausch und die Modellwiederverwendung. Ein Nachteil liegt jedoch in der zeitintensiven Implementierung eines solchen Systems.

### 3.3.3. Entwicklungsprozesskonzept

In den letzten beiden Kapiteln wurden der Prozess und das Informationsmanagement beschrieben. Die durchgängige Simulationsunterstützung ist eine Kombination aus Stand-Alone-Simulationen und von heterogenen Systemsimulationen mit Hilfe von multidisziplinären Simulationen (siehe TAB 3) zu spezifischen Meilensteinen. Das Informationsmanagementkonzept beinhaltet eine zentrale Informationsbasis. Im Folgenden werden diese Konzepte kombiniert zu einem integrierten Entwicklungsprozess (siehe BILD 1). Ziele sind dabei die Qualitätsverbesserung und die Reduktion von Iterationsschritten.



**BILD 6 Entwicklungsprozesskonzept**

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, gibt es zurzeit keinen adäquaten Einsatz der Simulation in der Konzeptphase. Die virtuelle Analyse verschiedener Konzepte ermöglicht die Auswahl eines optimierten Konzepts [17]. Aus diesem Grund wird die Simulation in dieser frühen Phase empfohlen.

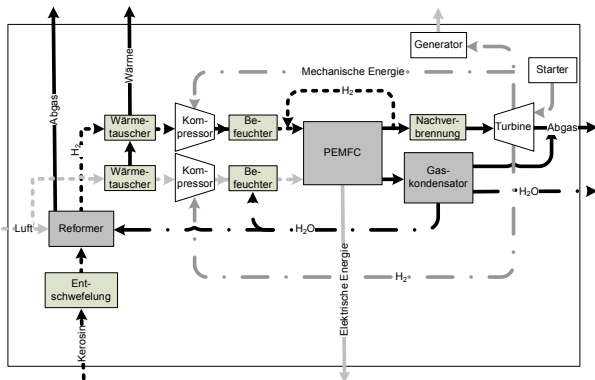
Im derzeitigen Prozess wird die Verifikation der Systemfunktionalität erst in einer späten Entwicklungsphase vorgenommen. Dies kann jedoch zu zeitintensiven Iterationsschritten führen. Einzelne Funktionalitäten werden von verschiedenen Systemen beeinflusst. Die Anpassung dieser Systeme bildet die Basis für die erforderliche Funktionalität. Dies stellt ein Problem dar, welches mit Hilfe der übergreifenden Systemsimulation gelöst werden kann. Zusätzlich kann eine Gesamtsimulation Systeminkompatibilitäten in der Konzept- und Spezifizierungsphase aufdecken. Dies verringert die Anzahl an Integrationstests und reduziert kostenintensive Iterationen in den späten Phasen. Ein Nachteil einer solchen Simulation liegt im zusätzlichen Aufwand für die Implementierung. Aus diesem Grund muss der Einsatz multidisziplinärer Simulation wohl überlegt werden. Das Ende der Konzeptphase und das Ende der Definierungsphase sind für übergreifende Systemsimulation geeignet (vgl. BILD 6). Am Ende der Konzeptphase wird die Systemarchitektur definiert und am Ende der Definitionsphase wird die Spezifikation an Zulieferer weitergegeben. Aus diesem Grund würden Änderungen der Systemarchitektur und der Spezifikation zu weit reichenden Modifikationen führen.

Zusätzlich zur Entwicklung von Systemkomponenten sollten die Zulieferer auch Simulationsmodelle der Komponenten liefern. Diese Modelle könnten in der Test- und Integrationsphase, sowie in nachfolgenden Entwicklungen verwendet werden. Mit HIL-kompatiblen Komponentenmodellen können zum Beispiel Schadensszenarien untersucht werden. Der Austausch und die Wiederverwendung von Modellen über eine Informationsbasis ermöglicht eine frühzeitige Entwicklung von Testeinrichtungen.

Zusammenfassend kann somit gesagt werden, dass eine durchgängige Simulationsunterstützung im Entwicklungsprozess Zeit und Kosten senkt. Die Basis eines reibungslosen Simulationseinsatzes bildet ein Informationsmanagementsystem.

## 4. ANWENDUNGSBEISPIEL: BRENNSTOFFZELLENSYSTEMSIMULATION

In BILD 7 ist das grundsätzliche Design einer Brennstoffzellen-APU für die Energie- und Wassererzeugung an Bord eines Flugzeuges dargestellt.



**BILD 7 Brennstoffzellen-APU an Bord eines Flugzeugs**

Der Wasserstoff wird mit Hilfe eines autothermen Reformierungsprozesses aus entschwefeltem Kerosin gewonnen. Thermische Energie wird dem autothermen Reformer solange zugeführt, bis die Betriebstemperatur erreicht ist. Bei dieser Temperatur wird ein Gleichgewicht zwischen der endothermen Dampfreformierung und der exothermen partiellen Oxidation erreicht. Für den Betrieb einer Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) müssen die Anode- und die Kathodegase befeuchtet werden (die Membran darf nicht austrocknen, während die Elektroden nicht geflutet werden dürfen). Die Brennstoffzelle wandelt chemische Energie in elektrische Energie um, wobei durch den Oxidationsprozess des Wasserstoffs gleichzeitig Wasser produziert wird.

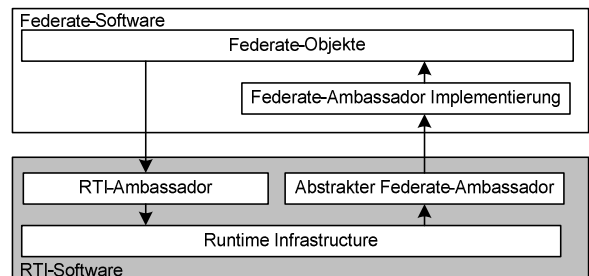
Für die Simulation eines Brennstoffzellensystems ist eine multidisziplinäre Simulationsumgebung notwendig, da bei der Modellierung einer Brennstoffzelle zum Beispiel im Reformer chemische und thermische sowie strömungsmechanische Effekte berücksichtigt werden müssen. Für den Turbinenstart und den Betrieb des Kompressors sind hingegen mechanische Modelle notwendig.

#### 4.1. Verteilte Simulation eines Brennstoffzellensystems

Wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben, kann die verteilte Simulation für die Simulation multidisziplinärer Systeme verwendet werden (siehe BILD 6). Für die Entwicklung der verteilten Brennstoffzellensimulation wurde die High Level Architecture (HLA) verwendet. Die Vorteile der HLA liegen im detaillierten Zeitmanagement und der Unabhängigkeit von einem Betriebssystem. Vorhandene Federates (Simulationsteilnehmer) können einfach angepasst werden, wenn Simulationsparameter verändert werden. Dies führt zu einer guten Wiederverwendbarkeit von HLA-Modellen. Die gesamte Kommunikation der Federation (Simulationskopplung von Federates) wird von der Runtime Infrastructure (RTI) geregelt. Federates kommunizieren über den RTI-

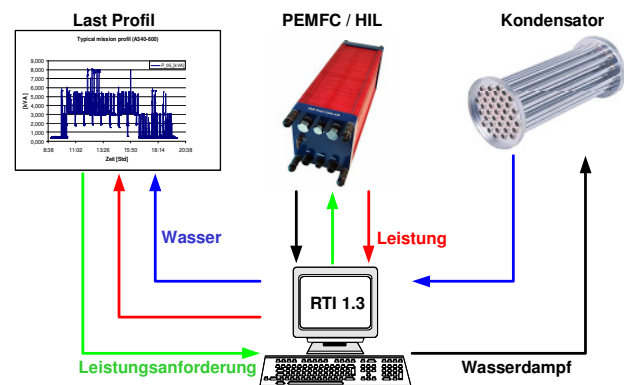
Ambassador mit der RTI, welche wiederum über den Federate-Ambassador antwortet (siehe BILD 8).

In BILD 9 wird die verteilte HLA-Simulation eines Brennstoffzellensystems dargestellt. Die verteilte Simulation besteht aus einem Kondensator für die Wasserkondensation, einem Brennstoffzellenstack und einem Lastprofil.



**BILD 8 HLA Botschafter-Konzept**

Zusätzliche Vorteile entstehen durch die Möglichkeit der räumlichen Trennung der Simulationsteilnehmer über die TCP/IP-Übermittlung und die Reduktion der Rechenzeit durch die logische Simulationsmodelltrennung.



**BILD 9 HLA-basierte Brennstoffzellensimulation**

Der Kondensator wird in Ottobrunn modelliert und simuliert, während ein realer Brennstoffzellenstack in Hamburg über HIL integriert wird. Es besteht keine Notwendigkeit für eine zentrale Integration der Simulationsteilnehmer, das Expertenwissen für die Einzelkomponenten ist jeweils vor Ort vorhanden. Dieses ermöglicht kurze Iterationsschleifen für die Fehlerbeseitigung.

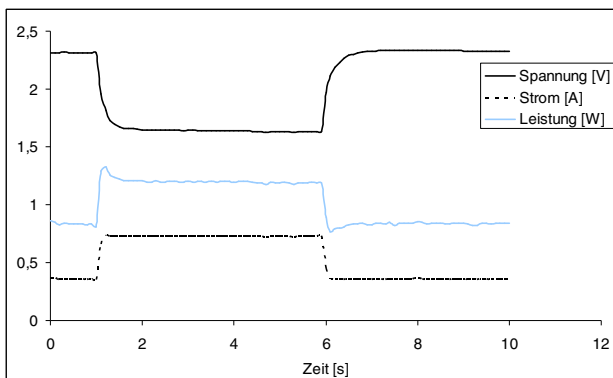
#### 4.2. Brennstoffzellen-Hardware-in-the-Loop Simulation

Wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, kann HIL in der Testphase eingesetzt werden, um zum Beispiel Schadensszenarien zu analysieren.

Es wurde eine HIL-Simulation mit MATLAB® SIMULINK erzeugt, um das dynamische Verhalten einer Brennstoffzelle für verschiedene Lastwechsel

aufzunehmen. Mit einer regelbaren Last kann ein Lastprofil nachgefahren werden. Der Widerstand ruft einen korrespondierenden Brennstoffzellenstrom hervor, und damit eine Spannungsänderung an der Brennstoffzelle. Die Leistung der PEMFC kann über das Ohm'sche Gesetz berechnet werden.

In BILD 10 ist die Sprungantwort einer Brennstoffzelle auf einen Lastwechsel dargestellt. Der Strom folgt der Anregung fast ohne Verzögerung, während die Spannung zunächst auf einem höheren Potential verweilt und sich dann dem neuen Spannungswert annähert. Dieses Verhalten ist auf die kapazitiven Eigenschaften der Brennstoffzelle zurückzuführen. Damit lässt sich auch das Überschwingen der Leistung erklären, da das Produkt aus Spannung und Strom direkt nach dem Sprung kurzzeitig ein erhöhtes Leistungsniveau ergibt.



**BILD 10 Sprungantwort einer Brennstoffzelle**

Die Sprungantwort der Brennstoffzelle erfolgt im Bereich von wenigen Sekunden. Um Aussagen über die Power-Qualität des Brennstoffzellensystems zu treffen, reichen diese Ergebnisse jedoch nicht aus, da nicht die Brennstoffzelle eine kritische Komponente in Bezug auf das dynamische Systemverhalten darstellt, sondern der Reformier, der Verdichter, der Gas- und Wassertransport und der Wärmehaushalt.

## 5. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Eelmann J. Hand out „High Temperature fuel cells as substitution of the conventional APU in a commercial aircraft“, DGLR-2003-183 Deutscher Luft- und Raumfahrt Kongress, München 2003
- [2] Daggett D. Fuel Cell APU for Commercial Aircrafts, Boeing Commercial Airplane, H2Expo 2005, Hamburg , pp 1-9, 2005
- [3] Milan G. Simulation von Produktionssystemen, Springer-Verlag, Wien New York 1995
- [4] Ledjeff-Hey K, Mahlendorf F, Roes J. Brennstoffzellen, 2. Auflage, Heidelberg: C.F. Müller, 2001

- [5] Dorange C, Olsen M J. Boeing Announces Partners for Fuel Cell Demonstrator Airplane Project, Chicago 11 July 2003  
[http://www.boeing.com/news/releases/2003/q3/nr\\_030711p.html](http://www.boeing.com/news/releases/2003/q3/nr_030711p.html)
- [6] Talbot D. Strom sparend fliegen, Technology Review - Das M.I.T. Magazin für Innovation, Ausgabe Nr. 9, pp 12, Heise Zeitschriften Verlag, Hannover September 2003
- [7] Scholz D. Unterrichtsskript für das Fach „Flugzeugsysteme“ an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Unterrichtsskript, 2004
- [8] Milan G. Simulation von Produktionssystemen, Springer-Verlag, Wien 1995
- [9] Mehl H. Methoden der verteilten Simulation, Vieweg Verlag, Braunschweig 1994
- [10] Schwarz P. Modellierung und Simulation heterogener technischer Systeme, Dresdener Arbeitstagung "Schaltungs- und Systementwurf" DASS'98, Dresden 1998
- [11] Partsch H. Requirements-Engineering systematisch: Modellbildung für softwaregestützte Systeme, Berlin 1998
- [12] Hrsg. Bundesministerium des Inneren. V-Modell XT, Version 1.2.0, 2004  
<http://www.v-modell-xt.de/>
- [13] Brychta P, Müller K. Technische Simulation, 1. Auflage, Vogel Industrie Medien, Würzburg 2004
- [14] Albers A, Nowicki L. Integration der Simulation in die Produktentwicklung, BMBF-Projekt ELAnO, Bremen, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, pp 141-147, 2003
- [15] Kosturiak J, Gregor M. Simulation von Produktionssystemen, Springer, Wien 1995
- [16] Dronka S. Die Simulation gekoppelter Mehrkörper- und Hydraulik-Modelle mit Erweiterung für Echtzeitsimulation, Shaker, Aachen 2004
- [17] Runge W, Gierer G, Deiss H. Neue Wege in der Entwicklungspartnerschaft zwischen Fahrzeughersteller, Zulieferer und Elektroniklieferant, VDI-Berichte 1374, pp 69-87, VDI-Verlag, Düsseldorf 1997