

# EMV Simulationsprozess für komplexe Kfz Systeme

Dr.-Ing. Johannes Hippeli, BMW AG, 80788 München, Deutschland,  
Johannes.Hippeli@bmw.de

## 1 Kurzfassung

EMV Simulation ist ein sehr anspruchsvolles, wertvolles und mächtiges Werkzeug für EMV Spezialisten. Wenn dieses Werkzeug nicht nur für einzelne individuelle Analysen, sondern auch als fester Bestandteil bei der Produktentwicklung komplexer Systeme verwendet werden soll, bedarf es einer Vielzahl an Voraussetzungen und Befähigungen. Dieser Fachartikel behandelt Fragestellungen und Lösungen, wie die EMV Simulation in den Entwicklungsprozess von Kraftfahrzeugen erfolgreich integriert werden kann.

Es wird diskutiert, warum die EMV Systemsimulation im Vergleich zur etablierten Crash Berechnung bei der Demokratisierung nicht mithalten kann. Anschließend wird der operative Simulationsprozess beschrieben, welcher sich aus der Datenbeschaffung, Modellierung, Berechnung und Auswertung zusammensetzt. Damit der Prozess funktionieren kann, werden Befähigungen benötigt. Zu den Befähigungen gehört ein professionelles Datenmanagement System, eine durchgängige Toolkette, abgestimmte synchronisierte Projektpläne des Gesamtsystems, fest definierte Simulationslastfälle und eine durchgängige Verifikations- und Validierungsstrategie.

Wenn der Prozess definiert und die Befähigungen sichergestellt sind, kann der Aufwand dem Nutzen gegenübergestellt werden, um den neuen Prozess zu bewerten.

## 2 Diskussion der EMV Simulation im Vergleich zur Crash Simulation

Die Crash Simulation wird seit Jahren erfolgreich mit Hilfe virtueller Methoden durchgeführt. Warum die elektromagnetische Simulation nicht in ähnlicher Art und Weise bei den Automobilfirmen Anwendung findet, wird in diesem Kapitel diskutiert. Um die Crash Simulation mit der EMV Simulation zu vergleichen, werden die Aufwände, die Anwendungen und der Nutzen jeweils gegenübergestellt.

### 2.1 Vergleich der Aufwände

Um Crash Berechnungen durchführen zu können, werden sehr detaillierte geometrische Modelle mit sehr genau charakterisierten Materialeigenschaften benötigt. Die Finite Elemente (FE) Modelle haben mehrere Millionen Netzzellen und die Verbindungstechnik von Kleber, Schrauben, Nieten, Schweißnähten etc. ist mit speziellen Modellierungsmethoden berücksichtigt. Eine der Schlüsselinformationen der Crash Berechnung sind die Materialeigenschaften. Jedes relevante Material muss hinsichtlich der mechanischen Umformungen wie Dehnung, Biegsamkeit oder Bruch u.a. in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, Temperatur und Krafteinwirkung charakterisiert

werden [1]. Die Abhängigkeiten sind in vielen Bereichen nichtlinear. Daher gibt es zur Charakterisierung sehr viele und aufwändige Versuchsreihen, die sehr teuer sind. Aus diesem Grund können die Materialeigenschaften verschlüsselt in den Materialbibliotheken der Modelle hinterlegt werden, um dieses wertvolle Wissen trotz firmenübergreifendem Einsatz und trotz großer Anzahl an Anwendern zu schützen.

Die EMV Simulation kommt im Gegensatz zur Crash Simulation mit viel einfacheren Geometriemodellen aus. Oftmals reichen Oberflächenmodelle mit mehreren zehntausend Netzzellen aus, um z.B. eine Fahrzeugkarosserie zu modellieren. Auch die Materialien sind viel einfacher zu berücksichtigen, da in vielen Fällen die elektrische Leitfähigkeit, Permeabilität oder Permittivität als skalare Werte ausreichend sind. In Einzelfällen werden die Materialeigenschaften komplexwertig und in Abhängigkeit der Frequenz benötigt, deren Charakterisierung spezielle Messtechnik benötigt. Die Anzahl der benötigten Materialien und die Aufwände zur Charakterisierung sind jedoch bei weitem nicht so groß wie bei der Crash Simulation. Oftmals reichen Erfahrungswerte aus, um eine ausreichende Genauigkeit bei den Berechnungen zu erzielen. Die Schwierigkeit der Modellerstellung bei der EMV Simulation besteht darin, die große Vielfalt an Modellierungsansätzen für das Verhalten von elektrischen oder elektronischen Baugruppen zu kennen und anwenden zu können. Modelle müssen je nach Untersuchung in einem Teilbereich des Frequenzbereichs von Hz bis GHz gültig sein und es gibt in der Elektrotechnik ebenfalls nichtlineares Verhalten (z.B. Sättigung von permeablen Filterkernen oder Halbleiter Kennlinien), dessen genaue Modellierung sehr aufwändig ist. Auf Grund der Vielfalt an Modellierungsmethoden ist bei der Anwendung Expertenwissen erforderlich, um die Gültigkeiten und Randbedingungen korrekt zu berücksichtigen. Geschütztes und wertvolles Wissen wie Schaltungstechniken oder Platinen Layouts lassen sich mit Verhaltensmodellen (*Model Order Reduction*, *Black Box* Modelle) schützen. Firmenübergreifende Zusammenarbeit und große Nutzerkreise lassen sich somit auch bei der EMV Simulation ermöglichen.

Prinzipiell spricht nichts dagegen auch für die EMV Simulation, analog zur Crash Berechnung, in die genaue Modellerstellung und deren Spezifikationen zu investieren. Die Anwendungen würden durch umfangreiche und anspruchsvolle Modellbibliotheken deutlich erleichtert werden. Letztlich muss geprüft werden, ob der erzielbare Nutzen die Aufwände rechtfertigt.

## **2.2 Vergleich der Anwendungen und deren Möglichkeit zur Demokratisierung**

Die Lastfälle der Crash Simulation (z.B. Front-, Seiten-, Heck-, Offset-, Überroll-Crashtest) sind zwar vielfältig und länderabhängig, jedoch standardisiert und sehr genau in Simulationsroutinen abbildbar. Zur Gegenüberstellung mit der EMV Simulation werden im Folgenden die Quelle oder Anregung im Simulationsmodell, das Koppelmodell und die Beobachtungsgrößen einzeln betrachtet.

Die Anregung bei der Crash Simulation ist sehr genau spezifiziert. Die Größe der Barrieren, Anfangsgeschwindigkeiten und Richtung des Aufpralls lassen kaum Spielraum für individuelle Ansätze oder Methoden zu. Im Gegensatz dazu gibt es bei der EMV Simulation unzählige Arten und Methoden der Quellmodellierung in Abhängigkeit der Domäne (Zeit-/Frequenzbereich), des erforderlichen Gültigkeitsbereichs und der Art der

Ausbreitung (z.B. leitungsgeführt, gestrahlt, Nahfeld, Fernfeld). Entsprechend viele individuelle Lastfälle und Lösungswege lassen sich daraus entwickeln.

Das Koppelmodell bei der Crash Simulation ist so gut wie unabhängig von der Anregung. Die FE-Modelle und Materialparameter können pro Variante einmalig erstellt werden und für viele unterschiedliche Lastfälle direkt verwendet werden. Bei der EMV Simulation hat die Art der Quelle bereits Auswirkung auf die benötigte Auswahl des Koppelmodells. Damit sich Ströme, Spannungen oder Felder von der Quelle zur Beobachtungsgröße hin richtig ausbreiten können, müssen Koppelmodelle individuell auf Grund unterschiedlicher dominanter Einflüsse angepasst werden. Die Kunst darin ist zu wissen, wie der benötigte elektromagnetische Effekt im Modell berücksichtigt werden kann und was alles weggelassen oder vernachlässigt werden kann. Somit ist auch beim Koppelmodell Expertenwissen erforderlich. Modellierungskataloge und Lastfallbeschreibungen würden sich sehr weit auffächern, falls diese für eine große Anzahl an Nutzern beschrieben werden sollten.

Die Beobachtungsgrößen sind bei der Crash Simulation relativ einfach interpretierbar. Einzuhaltende Verformungstiefen im Fahrgastraum, wirkende Kräfte auf Fahrzeugteile oder Personen, einzuhaltende Zeiten bei der Crash-Abschaltung usw. können genau spezifiziert und ausgewertet werden. Da es sich größtenteils um direkt messbare physikalische Größen im Modell und der Realität handelt, und auch Verformungen direkt bewertbar sind, ist ein Vergleich zwischen Simulation und Messung gut realisierbar und nachvollziehbar. Bei der EMV Simulation sind die Beobachtungsgrößen als einziger Modellbestandteil genau definiert. In der Regel sind das Ströme, Spannungen oder Felder an bestimmten Positionen im Modell. Diese orientieren sich meistens an genormten Messaufbauten. Der Unterschied zur Crash Simulation besteht darin, dass das Simulationsergebnis schwieriger mit der messtechnischen Realität verglichen werden kann. Denn physikalische Größen wie elektromagnetische Felder lassen sich nur indirekt messen, wobei die Messtechnik eine nicht zu vernachlässigende Rückwirkung auf die Messgröße selbst hat. Auch Stromverteilungen in metallischen Geometrien wie der Karosserie lassen sich nicht direkt messen und vergleichen. Ein weiterer Aspekt ist, dass subjektive Eindrücke, wie beispielsweise Störungen im Radioempfang oder Licht- bzw. Displayflackern, die ein Mensch mit seinen Sinnen wahrnehmen kann, äußerst schwierig in einem Modell abbildbar und darin auswertbar sind. Der Vergleich zwischen Simulation und Realität ist somit deutlich schwieriger.

Zusammengefasst existieren erhebliche Unterschiede bei der Beschreibung von Lastfällen oder Anwendungsfällen zwischen Crash und EMV Simulationen auf Systemebene. Dies liefert Argumente, warum die Demokratisierung der Crash Simulation viel weiter fortgeschritten ist als bei der EMV Simulation.

## **2.3 Vergleich des Nutzens**

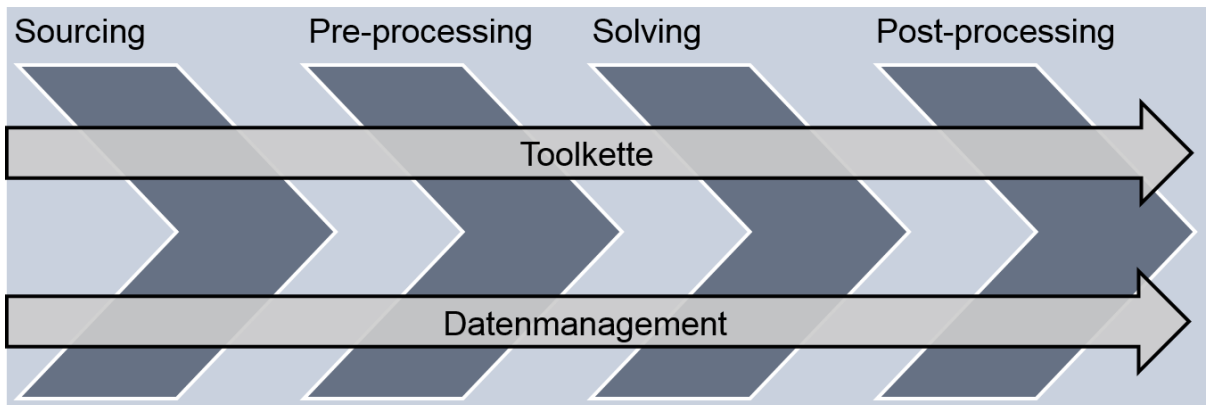
Der Nutzen der Crash Simulation ist offensichtlich. Aus Sicht der Verbraucher ermöglichen virtuelle Methoden eine optimale Gestaltung der Sicherheit im Falle von Unfällen, die sehr vielfältig sein können. Durch diese Optimierung werden unter Umständen Leben gerettet und Sicherheitsstandards ermöglicht, die über die gesetzlichen Anforderungen hinausgehen. Aus Sicht der Hersteller fließen die Crash Anforderungen mit Hilfe virtueller Methoden schon sehr früh in der Produktentwicklung

ein und Änderungen der Bauteile können ständig und effizient bewertet werden. Eine alternative Absicherung mit Hilfe von Hardware ist viel teurer (jeder Versuch kann mit derselben Hardware meist nur einmal durchgeführt werden) und auf Grund der zeitlichen Abhängigkeiten zwischen Auslegung und Absicherung viel träger als bei der virtuellen Absicherung. Sowohl für die Verbraucher, als auch für die Unternehmen sind das greifbare und überzeugende Vorteile.

Der Nutzen der EMV Simulation ist ebenfalls vorhanden, jedoch bei weitem nicht so offensichtlich und einfach zu argumentieren wie bei der Crash Simulation. Aus Sicht der Verbraucher ist die Situation eine andere. Ein Unfall wird meistens durch nachvollziehbares menschliches Fehlverhalten ausgelöst, kommt sehr häufig vor, ist statistisch erfassbar und hat fast immer eine Konsequenz und direkte Rückwirkung auf den Menschen. EMV-Probleme entstehen dagegen meist unwissentlich, werden nicht immer erkannt oder sogar fälschlicherweise als solche bewertet, sind viel seltener und haben auch dann nur vereinzelt eine nicht tolerierte Rückwirkung oder Konsequenz für den Menschen. Der Nutzen für Verbraucher wird durch die Vermeidung von EMV Problemen erzielt und kann nur schwierig quantifiziert werden. Für Unternehmen lässt sich der Nutzen virtueller EMV Methoden ebenfalls schwierig planen oder messen. Die Diskussion des Nutzens der EMV Simulation folgt in einem späteren Kapitel.

### 3 Prozessbeschreibung der EMV Simulation

Um einen Simulationsprozess in einem Unternehmen zu etablieren, ist die Definition und Beschreibung erforderlich. Je größer der Nutzerkreis wird, je mehr Schnittstellen vorhanden sind und je mehr Untersuchungen durchgeführt werden, umso wichtiger werden ordnende Prozesse.



**Bild 1:** Simulationsprozess

Ein Simulationsprozess kann in vier grundlegende Teilprozesse unterteilt werden. Der erste Prozessschritt ist die Datenbeschaffung (*sourcing*). Der zweite Prozessschritt ist die Modellvorbereitung (*pre-processing*). Der dritte Prozessschritt ist die Durchführung und Bewertung der Simulationen (*solving*). Der letzte Prozessschritt beinhaltet die Auswertung, Kommunikation und Transfer der Simulationsergebnisse (*post-processing*). Neben dem operativen Prozess, der den Ablauf der Simulationen beschreibt, werden mehrere Befähigungsprozesse im Unternehmen benötigt, die die Grundlagen, Rahmenbedingungen, Ressourcen und Infrastruktur sicherstellen. Diese

Befähigungsprozesse sorgen für einen reibungslosen Ablauf und für die benötigte Qualität.

In dieser Ausarbeitung werden das Datenmanagement, die Toolkette und die Bereitstellung aktueller Dokumentationen wie generische und projektbezogene Synchropläne, Anwendungen und Lastfälle behandelt. Die Qualitätssicherung ist eine der wichtigsten Voraussetzung für einen erfolgreichen Simulationsprozess. Verifikations- und Validierungsprozesse müssen sicherstellen, dass über die gesamte Toolkette verifizierte Modelle verwendet werden und durch den sicheren Umgang mit den Simulationsmethoden valide und belastbare Ergebnisse generiert werden.

### 3.1 Datenmanagement

Das Datenmanagement begleitet den Prozess der Modellerstellung, sorgt für die Bereitstellung der Modelle und die Archivierung von Simulationsprojekten und Ergebnissen. Ein Datenbanksystem mit Rechtevergabe, Ermöglichung zur Ableitung von Modellen und Varianten, Freigabe von Modellen, Verknüpfungsmöglichkeiten verschiedener Datenquellen und Schaffung von Beziehungswissen sind Beispiele für Inhalte des Datenmanagements. Es empfiehlt sich, Arbeitsabläufe in das Datenmanagementsystem zu integrieren. Damit lassen sich ständig wiederholende Abläufe wie z.B. Assemblierungsschritte, Berechnungen oder Auswertungen automatisieren. Professionelles Datenmanagement trägt dazu bei, die Datenintegrität zu verbessern, den Verifikationsprozess zu vereinfachen und den Simulationsprozess in allen Schritten zu automatisieren.

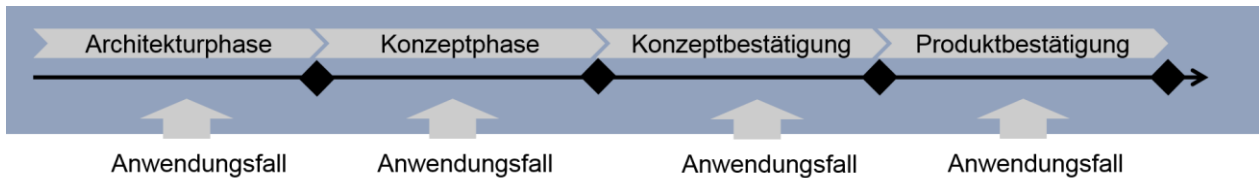
### 3.2 Toolkette

Die Toolkette und deren Weiterentwicklung hin zu automatisierten Schnittstellen ist eine weitere Befähigung für einen effizienten Simulationsprozess. Toolketten sind unternehmensspezifisch und müssen zwischen einzelnen Fachbereichen abgestimmt werden. Bei der Datenbereitstellung gibt es Datenbanken, Datenformate und manuelle Schnittstellen zu betrachten. Beim *pre-processing* können Modellierungsvorschriften und Modellierungskataloge helfen, die richtigen Datenformate und Schnittstellen zu befähigen. Es werden Tools zur Verhaltensmodellierung oder für *Model Order Reduction* (MOR) benötigt. Manuelle Schritte bei der Datenaufbereitung können erforderlich sein, sollten jedoch auf Grund der Fehleranfälligkeit vermeiden werden. Beim *solving* werden Tools zur Berechnung benötigt, welche geeignete Lösungsverfahren und Import Schnittstellen aufweisen. Das *post-processing* benötigt Tools zur Auswertung und Darstellung von Simulationsergebnissen. Diese Tools müssen in der Lage sein, Auswertungen zu automatisieren und geeignet darzustellen.

Eine Toolkette mit geeigneten Schnittstellen sorgt dafür, dass im Prozess Verifikationsstrategien automatisiert werden. Zu viele manuelle Schnittstellen in der Toolkette sind fehleranfällig und können dazu führen, dass z.B. alte oder ungültige Teilmodelle, Modelleigenschaften, Varianten oder Ergebnisse verwendet werden.

### 3.3 Synchropläne

Synchropläne sind unternehmensspezifisch. In den Prozessen der Produktentstehung lassen sich Synchropläne in verschiedene Phasen einteilen. In jeder Phase können spezifische Anwendungsfälle für EMV Simulationen mit der jeweils phasenadäquaten Modellreife etabliert werden.



**Bild 2:** Phasen eines generischen Synchroplans im Produktentstehungsprozess

In der Architekturphase und Konzeptphase liegen Daten unvollständig oder ungenau vor. In diesen Phasen können Simulationsstudien, Reviews, vergleichende Simulationen oder die Ermittlung und Dimensionierung von Designregeln als nützliche Anwendungsfälle eingesetzt werden. Während der Konzeptbestätigung und Produktbestätigung liegen genauere Daten vor. Meistens gibt es in diesen Phasen Hardware Prototypen zur Absicherung. In diesen Phasen können Simulationen Messungen ergänzen. Mit Hilfe von Messungen können alle relevanten Parameter ermittelt werden und mit Hilfe der Simulation können diese optimiert werden. Weiterhin können Probleme analysiert und verstanden werden. Basierend auf Erfahrungen können immer wieder Anwendungsfälle entwickelt oder weiterentwickelt werden.

### 3.4 Anwendungen und Lastfälle

Anwendungen und Lastfälle, die wiederkehrend verwendet werden sollen, müssen von erfahrenen Simulationsexperten entwickelt werden. Für den gesamten Ablauf muss stets vom *sourcing* bis zum *post-processing* jeder Schritt durchdacht und stabil anwendbar sein. Der Simulationsexperte sollte sich in den Themengebieten EMV (v.a. Praxiserfahrung), elektromagnetische Feldtheorie, Solver und numerische Verfahren, den Simulationstools sowie CAD-Anwendungen bestens auskennen. Im Idealfall werden bei der Entwicklung der Anwendung Verifikationsstrategien berücksichtigt. Um eine Anwendung für den breiten Einsatz freizugeben, sollte diese ausreichend validiert sein. Bei bestandener Validierung und Vertrauen in die Anwendung kann dieser Schritt bei Folgeanwendungen entfallen. Die Verifikation der Teilschritte des entwickelten Ablaufs einer Anwendung bleibt hingegen zur Sicherstellung der Qualität bestehen.

Das Ergebnis ist ein leicht bedienbarer und prozesssicherer Anwendungsfall, der von erfahrenen und auch von weniger erfahrenen Anwendern fehlerfrei genutzt werden kann. Es ist unbedingt zu vermeiden, falsche Rückschlüsse aus schlecht definierten und mit verborgenen Fehlern behafteten Anwendungsfällen zu ziehen, weil dadurch die Glaubwürdigkeit und der Nutzen der gesamten Simulation in Frage gestellt werden kann.

### 3.5 Verifikation und Validierung

Bei den Anwendungsfällen soll eine durchgängige Verifikations- und Validierungsstrategie

(V&V) berücksichtigt werden. Andernfalls ist der dauerhafte Nutzen nur schwierig realisierbar.

Beim *sourcing* ist die Verifikation am wichtigsten. Wenn falsche, zu alte oder fehlerhafte Daten verwendet werden, wird viel Aufwand für zweifelhafte Ergebnisse erzeugt. Durchgängige Toolketten, passende Datenformate und Schnittstellen, sowie professionelles Datenmanagement unterstützen die Verifikation. Die Validierung soll im besten Fall für alle Teilergebnisse durchführbar sein. Wenn beispielsweise MOR-Methoden verwendet werden, sollten diese mindestens einmalig mit analytischen Methoden oder Messungen verifiziert oder validiert worden sein, um den Gültigkeitsbereich zu kennen.

Für die Demokratisierung der EMV Simulation in einem Unternehmen ist es eine Voraussetzung, dass die V&V-Strategie entlang der operativen Ausführung der entwickelten Simulationsprozesse mit berücksichtigt ist. Wenn die EMV Simulation als Dienstleistung wichtige Ergebnisse für Entscheidungen liefert, sollte zusätzlich über die Zertifizierung der Simulation nachgedacht werden [2].

#### **4 Nutzen des EMV Simulationsprozesses**

Der Nutzen ist die treibende Kraft für einen neuen Prozess. Im Falle der EMV werden bestehende Prozesse ersetzt oder ergänzt. Beim Ersetzen findet eine Kompensation mit wegfallenden Aufwänden statt. Bei einer Ergänzung muss sich die Effizienz oder ein übergeordneter Nutzen steigern, um die zusätzlichen Aufwände zu rechtfertigen.

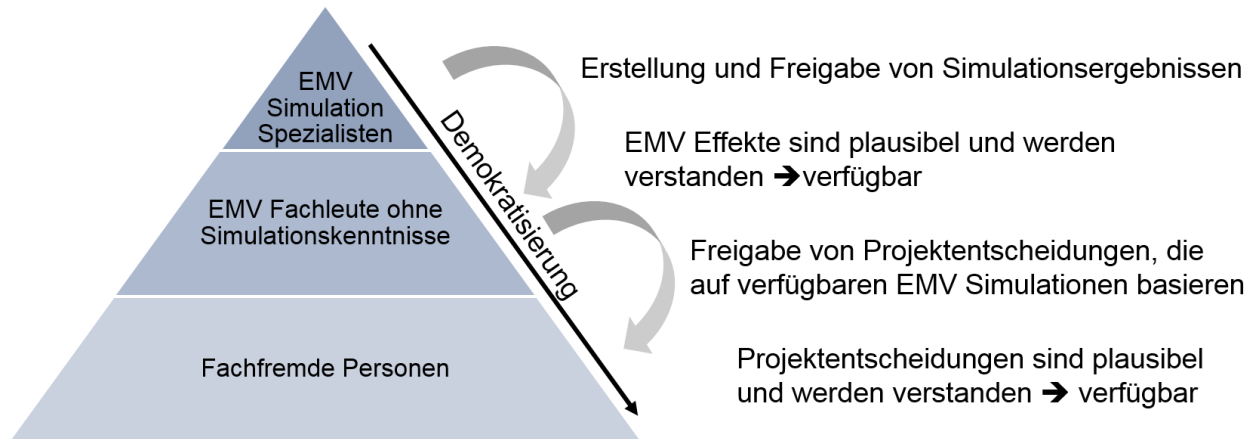
Eine messbare Effizienzsteigerung kann dadurch erzielt werden, dass Hardware Bedarfe zur Entwicklung und Absicherung reduziert werden, dass ungeplante Entwicklungsleistungen reduziert werden, oder dass eine frühere Produktreife den Entwicklungsprozess verkürzt. Unternehmerischer Nutzen kann entstehen, wenn die zusätzlich entstandenen Erkenntnisse das Wissen und die Ausbildung des Personals steigern. Wenn optimierte und intelligente EMV-Konzepte die Produktkosten reduzieren oder Produktmerkmale verbessern, können Wettbewerbsvorteile erzielt werden.

Strategischer unternehmerischer Nutzen kann auch ein Argument sein. Mit Hilfe neuer virtueller Methoden und Tools können immer komplexere Systeme entwickelt werden, wo hingegen herkömmliche Methoden an ihre Grenzen kommen. Komplexität zeichnet sich darin aus, dass sie nicht lösbar ist und es keine Möglichkeit der exakten Bestimmung und Modellierung gibt [3]. Sie lässt sich jedoch mit geeigneten Methoden und Werkzeugen wie der EMV Simulation, sowie einem hohen Maß an Wissen über die kausalen Zusammenhänge der Systemelemente deutlich einschränken und reduzieren.

#### **5 Zusammenfassung und Diskussion**

Der Weg von einzelnen Simulationsprojekten hin zu einer durchgängigen Verankerung der Simulation im Entwicklungsprozess von komplexen Systemen ist eine große Herausforderung. Wenn die Voraussetzungen geschaffen sind, können etablierte und vor allem einmalig erfolgreiche Simulationen und Anwendungen ständig und mit reproduzierbarem Nutzen angewendet werden. In erster Linie wird die Arbeit der Simulationsexperten effizienter und produktiver, wenn es einen Simulationsprozess und dessen Befähigung im Unternehmen gibt. Nach einer gewissen Anlaufphase kann die Demokratisierung der EMV Simulation thematisiert werden. Die Demokratisierung der EMV Simulation muss im Speziellen definiert werden. Prinzipiell bedeutet dies, dass der

Allgemeinheit etwas zur Verfügung gestellt wird, was vorher nur privilegierten Personen zugänglich war. Bei dem Vergleich mit der Crash Simulation wurde diskutiert, warum die EMV Simulationen sehr individuell und schwierig anwendbar sind. Daher macht es im ersten Schritt keinen Sinn, dass die Tools und Methoden der Allgemeinheit zugänglich gemacht werden. Vielmehr sollten zuerst Ergebnisse aus Simulationen zugänglich und damit demokratisiert werden (siehe Bild 3). Dies führt zu mehr Akzeptanz für getroffene Entscheidungen.



**Bild 3:** Demokratisierung der EMV Simulation

Bis die Tools und Anwendungsfälle in Form von einfach bedienbaren Apps der Allgemeinheit verfügbar gemacht werden können, muss die V&V Strategie von der Software verantwortet werden. Dieses Ziel kann als Herausforderung der nächsten Jahrzehnte angenommen werden. Für andere Disziplinen wie CFD (*Computational Fluid Dynamics*), die ebenfalls nicht die Nutzerzahlen von Crash Simulanten erreicht hat, gibt es vergleichbare Diskussionen zu dem Thema der Demokratisierung mit ähnlicher Analyse und Fazit [4].

## Literaturangaben

[1] FAT-Schriftenreihe 211: Dynamische Werkstoffkennwerte für die Crashsimulation, Verband der Automobilindustrie, April 2007

[2] S. Lange, M. Schaarschmidt, F. Sabath, „On the need of certification in computational electromagnetic based engineering services“, 2015, IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Dresden, Germany

[3] D. Dörner, H. W. Kreuzig, F. Reither & T. Stäudel, 1994, „Lohhausen. Vom Umgang mit Unbestimmtheit und Komplexität“. Verlag Hans Huber, 2. Auflage

[4] R.K. Hanna; I. Weinhold, 2017, „Die Demokratisierung der CFD-Simulation“, Whitepaper von Mentor Graphics (zuletzt aufgerufen am 17.11.2017): <https://www.mentor.com/products/mechanical/resources/overview/the-democratization-of-cfd-423eb1c2-81a0-43e0-a03e-2a9e30a19b30>