

# Die Wirksamkeit von Warnsystemen durch Simulation erhöhen

Lukas Schuler

xirrus GmbH, Buchzelgstrasse 36, CH-8053 Zürich

lukas.schuler@xirrus.ch

**Warnsysteme sind häufig grosse, vernetzte und verzahnte Gebilde. Sie funktionieren, wenn sie die Überwachung, die Feststellung einer Gefahr, die Sichtung, Interpretation und Massnahmen mit einschliessen. Moderne Warnsysteme werden durch Entscheidungshilfen, Kommunikationslinien und Netzwerke beschleunigt oder erst ermöglicht. Versagen sie, oder sind sie für Extremsituationen ungeeignet ausgelegt, können grosse Schäden entstehen, deren Vermeidung eigentlich Ziel des Warnsystems wären.**

**Computersimulation kann die Technik nachbilden und das Gesamtsystem in allen erdenklichen Extremsituationen gefahrlos auf das einwandfreie Funktionieren hin untersuchen. Die Wirksamkeit kann überprüft und die Zuverlässigkeit beurteilt und optimiert werden. Dies wird für das Flarm Warnsystem gezeigt.**

## 1 Einleitung

In der Forschung an der ETH Zürich haben wir Computersimulation für die Untersuchung von Molekülen und chemischen Reaktionen eingesetzt (VAN GUNSTEREN *et al.* 1996, 2001). Insbesondere haben wir uns auf die Parametrisierung von Modellen (SCHULER *et al.* 2001) und die Weiterentwicklung von Simulationssoftware (BERWEGER *et al.* 1997) spezialisiert. Diese Expertise setzen wir heute ein, um für Industrie, Forschung und Innovation komplexe Systeme zu untersuchen, Risiken zu prüfen und Wege zur Optimierung von Sicherheit und Wirksamkeit zu finden. Computersimulation eignet sich aus verschiedenen Gründen hervorragend:

- Umfangreiche Systeme können überprüft und optimiert werden. Limiten sind nur durch verwendete Speicher, Programmierung, Rechenleistung und Arbeitsaufwand gegeben.
- Ein experimentell unmöglich herbeizuführendes (Unwetter!) oder zu gefährliches Ereignis (Überschwemmung!) kann dennoch überprüft werden, da in der Simulation keine echten Schäden oder Gefahren entstehen.

- Bei korrekter Umsetzung der Modelle und Simulation sind die Resultate objektiv gültig und besser als eine Schätzung.
- Oft werden Zusammenhänge und Schwachstellen entdeckt, welche auf relevante Risiken hinweisen.
- Vorschläge für Verbesserungen lassen sich rasch auf ihre Wirksamkeit und Relevanz testen. Nach der Umsetzung tragen sie unmittelbar zur Schadenvermeidung bei.
- Reale Störfälle können mit dem Modell verglichen werden. Das kann Sachverhalte aufklären helfen, die vorher unverständlich blieben. Das vereinfacht das Lernen aus Fehlern.
- Durch Vergleiche von realen Schadensereignissen mit der Simulation werden auch Schwächen des Modells klarer und es kann weiter verbessert werden, was wiederum der Schadensbegrenzung dient.

### 1.1 Technik

Die technischen oder physikalischen Prozesse, sowie automatisierte, programmierte Geräte lassen sich, wenn die verwendeten Verfahren und Gesetzmässigkeiten bekannt sind, in einer Computersimulation exakt nachbilden. Dies hat den Vorteil, dass die Modell-

aussagen mit der Realität praktisch deckungsgleich werden. Die Simulation macht damit verlässliche Aussagen und Prognosen.

Zudem kann das simulierte Geschehen viel detaillierter beobachtet werden. So können beispielsweise an beliebigen Stellen Observablen eingerichtet werden, welche den Verlauf des Systems festhalten, die in Realität oft nicht oder nur unzureichend geprüft werden können oder das System selber beeinträchtigen würden.

### 1.2 Mensch

Das menschliche Verhalten als Teil eines Warn- und Massnahmensystems ist ein kritischer Faktor: Rasche Entscheidungen in Stress-Situationen oder in komplexen Situationen sind keine Stärken menschlichen Denkens. Hier kann Simulation helfen, vorgängig klare und damit einfach auszuführende Massnahmenpläne zu erstellen. Dabei können in der Simulation verschiedene Gefahrenszenarien herbeigeführt werden und entsprechende Gegenmassnahmen gefahrlos ausprobiert werden. Die wirkungsvollsten Massnahmen (welche oft nicht intuitiv sind) werden dokumentiert. Das verbessert die Schulung der Verantwortlichen und vereinfacht deren Handeln im Notfall.

Im Idealfall kann eine Simulation in Echtzeit sogar eine aktuelle Gefahrenlage analysieren und wirksame Gegenmassnahmen vorschlagen.

### 1.3 Beispiel Flarm: Ein Kollisionswarngerät im praktischen Einsatz

Tausende Kleinflugzeug-Piloten aus den Alpenländern nutzen das Kollisionswarngerät Flarm (OETIKER und

SCHEEL 2006) aus Schweizerischer Produktion. Es warnt im Flugbetrieb vor gefährlichen Annäherungen durch andere Geräte-Betreiber und vor stationären Hindernissen wie Seilbahnen. Seit 2004 hat es sich kontinuierlich zum De-Facto-Standard entwickelt und in der Praxis bewährt.

Das Prinzip ist einfach: Jedes Gerät empfängt über GPS die aktuelle Position des Flugzeugs und sendet sie mitsamt Flugrichtung und Geschwindigkeit an kompatible Kollisionswarngeräte. Die empfangenen Flugbewegungen der umgebenden Geräte werden ausgewertet: Kommt jemand zu nahe oder deuten die Flugpfade auf eine mögliche Kollision hin, wird den betroffenen Piloten eine Warnung ausgegeben. Es liegt dann in der Verantwortung der Piloten, geeignete Massnahmen zur Vermeidung einer Kollision vorzunehmen.

Der Gewinn an Sicherheit in der Privatfliegerei ist praktisch spürbar. Das System wurde anlässlich der Aero-Messe 2007 mit dem Innovationspreis für technische Entwicklungen im Luftsport des Prince Alvaro de Orleans-Bourbon Fund ausgezeichnet.

Doch wie sicher ist ein solches System unter Extrembedingungen? Da das Zeitfenster zur Übermittlung der Daten begrenzt ist, können bei hohem Verkehrsaufkommen nicht alle Daten ausgetauscht werden. Wie liesse es sich mit geringem Aufwand (Update der Software ohne Neukauf/Umrüsten der Hardware) noch sicherer machen? Wie würde sich eine angedachte Änderung des Kommunikationsprotokolls auf die Sicherheit auswirken? Die Fragen des Herstellers wurden von uns mit Simulation methodisch untersucht und beantwortet (BERWEGER *et al.* 2008).

## 2 Methoden

### 2.1 Konzeptuelle Grundlagen

Als Grundlage dient unsere selber entwickelte Simulations-Software «ximulon», welche unsere Erfahrung aus diversen Simulationsprojekten umschliesst und laufend weiterentwickelt wird. Durch den hohen Abstraktionsgrad können Simulationskonzepte aus verschiedenen Bereichen übertragen und weiterverwendet werden. Dieses

Vorgehen macht es einfach, neue Modelle zu implementieren und bestehende Simulationsverfahren darauf anzuwenden.

Dadurch konzentriert sich die Umsetzung auf das Modell statt auf die Programmierung, auf die Resultate statt deren Gewinnung. Zudem werden Fehlerquellen eliminiert und die Zuverlässigkeit erhöht. Die Vertrauenswürdigkeit der Resultate wird darüber hinaus durch eine umfassende Test-Suite und einen Konsistenz-Checker sichergestellt, welcher die Konsistenz des Modells automatisch überprüfen kann. Die Simulationsumsetzung ist also schneller und sicherer, als wenn man jedes Mal eine eigene spezifische Applikation entwickeln wollte.

Die Ein- und Ausgabe erfolgt via XML und stellt so die Übertragbarkeit und Flexibilität sicher. Das Format ist menschenlesbar und transparent, kann leicht in andere Formate umgewandelt werden oder in anderen Programmen verwendet werden. Das Programm ist darüber hinaus plattformübergreifend nutzbar.

### 2.2 Modellumsetzung

Neue Modelle werden durch neue Module beschrieben und in die Software eingeklinkt. Bestehende Konzepte können übernommen werden und brauchen nicht neu erfunden zu werden. Damit werden Fehlerquellen ausgeschaltet und raschere Resultate ermöglicht.

Ein Szenariengenerator erstellt tausende von möglichen Situationen nach vorgegebenen Mustern und Regeln. Die Szenarien werden darauf hin durchgerechnet und zeitlich vorangetrieben. Die Resultate werden daraufhin analysiert und zusammengefasst. Häufig weisen die Zwischenresultate auf Problemfelder hin, die in iterativen Verfeinerungen näher untersucht werden können. So entsteht nach und nach ein vollständigeres Bild des untersuchten Systems.

Die Software ist auf deterministische Dynamik, stochastische Dynamik und Monte-Carlo-Simulation ausgerichtet. Da die Zufallsdynamik intern deterministisch realisiert wird, kann jedes Szenario exakt reproduziert werden. Ent-

decken wir also in einem Szenario einen interessanten Effekt, den wir näher untersuchen wollen, und stellen entsetzt fest, dass wir relevante Daten nicht beobachtet und festgehalten haben, ergänzen wir einfach die nötigen Observablen und spielen das Szenario erneut – identisch – durch.

Als Systeme eignen sich alle, die sich auf Akteure mit Interaktionen zurückführen lassen, zum Beispiel:

- Molekuldynamik: Atome (Akteure) mit chemischen Bindungen und physikalischen Kräften (Interaktionen)
- Astrophysik: Sonnen, Planeten und Monde (Akteure) mit Gravitation (Interaktion)
- Kollisionswarnsystem: Warngerät (Akteur) mit Kommunikationsprotokoll (Interaktion)
- Verkehrssimulation: Autos (Akteure) mit Fahrverhalten (Interaktion)
- Kommunikationsnetze: Schaltzentralen (Akteure) mit Verbindungen (Interaktionen)

Weniger geeignet sind kontinuierliche Systeme (Fluiddynamik, CFD).

### 2.3 Beispiel Flarm

Niemand würde tausende Piloten und Flugzeuge durch einen Praxistest riskanter Annäherungen gefährden wollen um herauszufinden, wie belastbar das verwendete Warnsystem ist. Darüber hinaus könnte bei einem Zusammenbruch des Systems auch der Grund dafür kaum eruiert werden – und kaum Verbesserungspotential gefunden werden.

Eine Simulation kann dies alles tun – und präzise Aussagen zur Wirksamkeit und Vorschläge zur Erhöhung der Wirksamkeit machen.

In unseren Modellen können wir die Eigenschaften von individuellen Einheiten, wie den Sendern und Empfängern, sowie die Beziehungen, wie das verwendete Funkprotokoll und die gesendeten Informationen und deren Auswertung so exakt wie bekannt abbilden.

Für die Simulation brauchten wir nur das Kommunikationsprotokoll nachzubilden, das aufgrund der Spezifikationen des Herstellers detailliert

bekannt ist. Aus der Welt der Molekulardynamik wurden beispielsweise die periodischen Randbedingungen übertragen. Obwohl der untersuchte Luftraum endlich und relativ klein ist, ist das simulierte System virtuell unendlich gross, weil der Luftraum an den Rändern periodisch repliziert wird. Wegen der beschränkten Reichweite des Funksignals kommen sich die periodischen Replikationen dennoch nicht in die Quere. Durch diesen Kunstgriff lässt sich die Statistik der Resultate dramatisch erhöhen und gleichzeitig Randeffekte vermeiden.

Der Szenariengenerator verteilt dann eine Anzahl Flugzeuge im virtuellen Luftraum – zufällig, aber mit einer in der Segelfliegerei typischen Höhenverteilung. So können wir in der Simulation alle Segelflugzeuge der Schweiz in einem kleinen definierten Luftraum gleichzeitig verteilen, oder bei Bedarf noch tausende mehr. Man stelle sich die Kosten und die logistische Herausforderung vor, wollte man ein solches Szenario als reales Experiment nachstellen!

### 3 Resultate

#### 3.1 Simuliertes System und Ziele

In der Simulation haben wir Flugzeugdichten von 10 bis 8000 Flugzeuge im einem virtuellen Luftraum von 18 × 18 km und 5000 m Flughöhe durchgetestet und von jeder Dichte 480000 einzelne Empfangssituationen analysiert. So können wir zahlreiche gefährliche Situationen erkennen und auswerten.

Das besondere daran ist, dass sich diese Methode zuverlässig eignet, weil sie die technischen Risiken exakt berechnet. Wenn das Gerät wegen hohem Verkehrsaufkommen keinen klaren Empfang mehr hat und die Gefahrenquellen nicht mehr interpretieren kann, ist das sicherheitsrelevant für den Hersteller. Diese Grenzen müssen bekannt sein. Während das Kommunikationsprotokoll logisch entworfen wurde und im Feldversuch mit einigen wenigen Geräten getestet wurde, wird die Situation bei hohem Verkehrsaufkommen rasch unübersichtlich, wenn jedes Gerät mit jedem Gerät in Reichweite kommunizieren soll. In diesem

Bereich ergänzt Simulation das fehlende Wissen und zeigt Grenzen der Wirksamkeit auf, zeigt deren Ursachen auf, und kann Vorschläge zur Verbesserung machen.

#### 3.2 Beispielhafte Resultate

Flarm schafft es für jeden Piloten, mit durchschnittlich 20 bis 25 umfliegenden Nachbarn gleichzeitig zu kommunizieren und diese so im Auge zu behalten. Um diese Auslastung zu erreichen, müssten allerdings sämtliche ca. 1000 Segelflugzeuge der Schweiz in einem Luftraum von 18 × 18 km unterwegs sein. Das gewählte Kommunikationsprotokoll ist also sicher.

Dieser Wert ist gut, kann aber um weitere 10 % erhöht werden. Dazu ist eine konkret benannte Änderung des Kommunikationsprotokolls nötig. Der Vorschlag kann nun in der Simulation ausgiebig geprüft werden, bevor alle mehrere tausend Geräte angepasst werden. Eine solche Änderung muss auf allen Geräten gleichzeitig erfolgen, da die Protokolle unter Umständen nicht miteinander kompatibel sind. Daher will man eine solche Änderung nicht aufs Geratewohl vornehmen.

#### 3.3 Ausblick

Sollte sich der Hersteller sogar entschliessen, für eine Erweiterung des Warnsystems einen Handlungsvorschlag zur Abwendung einer Kollision zu integrieren, kann der gewählte Algorithmus ebenfalls in einer Simulation geprüft werden, in der viele tausende kritische Situationen erzeugt werden, die Flugzeuge nach dem Vorschlag bewegt werden und die Resultate beobachtet werden – wiederum gefahrlos für Mensch und Maschine.

### 4 Fazit

Auf diese Weise tragen Simulationen zur Erhöhung der Wirksamkeit von Warnsystemen bei:

- Automatisches, schnelles und gefahrloses Durchtesten von tausenden von Gefahrenszenarien decken Schwachstellen und Zusammenbrüche auf und finden Grenzen.

- Genaue Aussagen über die Gründe und Ursache der Schwächen liefern konkrete Verbesserungsvorschläge und vermeiden unnötige Diskussionen und Hypothesen.
- Die Simulation von Massnahmen, die bei Gefahrensituationen zu ergreifen sind, ermittelt die wirksamsten Gegenmassnahmen. So können einfach zu handhabende Massnahmenpläne geschaffen werden, oder die Simulation schlägt gleich die für die aktuelle Situation vorteilhaftesten Handlungen vor.

### 5 Literatur

- BERWEGER, C.D.; VAN GUNSTEREN, W.F.; MÜLLER-PLATHE, F., 1997: Finite Element Interpolation for Combined Classical/Quantum Mechanical Molecular Dynamics Simulations. *J. Comput. Chem.* 18: 1484–1495.
- BERWEGER, C.D.; SCHULER, L.D.; SCHLAPBACH, A.: Computer Simulation of the Flarm Communication Protocol. Publikation in Vorbereitung: 2008.
- OETIKER, T.; SCHEEL, M., 2006: Kollision verhindern! Flarm! *Swiss Glider* 5: 42–49.
- SCHULER, L.D.; DAURA, X.; VAN GUNSTEREN, W.F., 2001: An Improved GROMOS96 Force Field for Aliphatic Hydrocarbons in the Condensed Phase. *J. Comput. Chem.* 22: 1205–1218.
- VAN GUNSTEREN, W.F.; BILLETER, S.R.; EISING, A.A.; HÜNENBERGER, P.H.; KRÜGER, P.; MARK, A.E.; SCOTT, W.R.P.; TIRONI, I.G., 1996: Biomolecular Simulation: The GROMOS96 Manual and User Guide. Zürich, Vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.
- VAN GUNSTEREN, W.F.; BAKOWIES, D.; BÜRGI, R.; CHANDRASEKHAR I.; CHRISTEN, M.; DAURA, X.; GEE, P.; GLÄTTLI, A.; HANSSON, T.; OOSTENBRINK, C.; PETER, C.; PITERA, J.; SCHULER, L.; SOARES, T.; YU, H., 2001: Molecular Dynamics Simulation of Biomolecular Systems. *Chimia* 55: 856–860.

**Abstract****Enhancing the efficacy of warning systems by computer simulation**

Warning systems are often complex networks of measurement devices, communication lines, decision makers, and measures to be taken. While the single units are reasonably designed, the overall performance of the whole system is often hard to estimate, especially when challenged with exceptional events.

Computer simulation is a means of assessing such situations. The warning system is subjected to a large number of (potentially dangerous) scenarios in order to discover and eliminate weaknesses and flaws. Moreover, potential countermeasures can be simulated to find the most effective actions to be taken when warnings are raised.

This concept is applied to the Flarm collision avoidance system used in glider planes in Europe. It is shown that the system breakdown is far beyond common volume of traffic. Moreover, improvements are suggested to further increase safety. Future changes can be tested in the simulation prior to release.

While the concept is demonstrated to work for Flarm, it is generally applicable to other warning systems and danger situations.

Keywords: warning system, computer simulation, safety, effectiveness, countermeasures, improvement