SIMULATION X®
Powered by ITI

Virtuelle Inbetriebnahme mechatronischer Systeme mit Hardware-in-the-Loop Techniken

Torsten Blochwitz

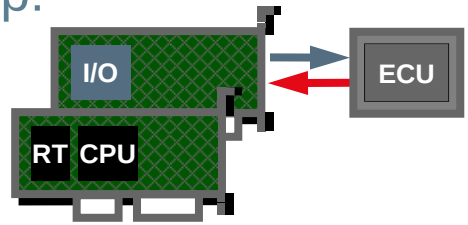
Jens Schindler

ITI GmbH

Motivation

- Bei Softwareentwicklung und Test von Steuerungen (SPS, ECU) wird das zu steuernde System benötigt.
  - Noch nicht fertig
  - Prototypen sind teuer
  - Unhandlich

- Ersatz des realen Systems durch virtuellen Prototyp:
  - Erzeugt das gleiche elektrische Ein-Ausgangsverhalten wie das reale System



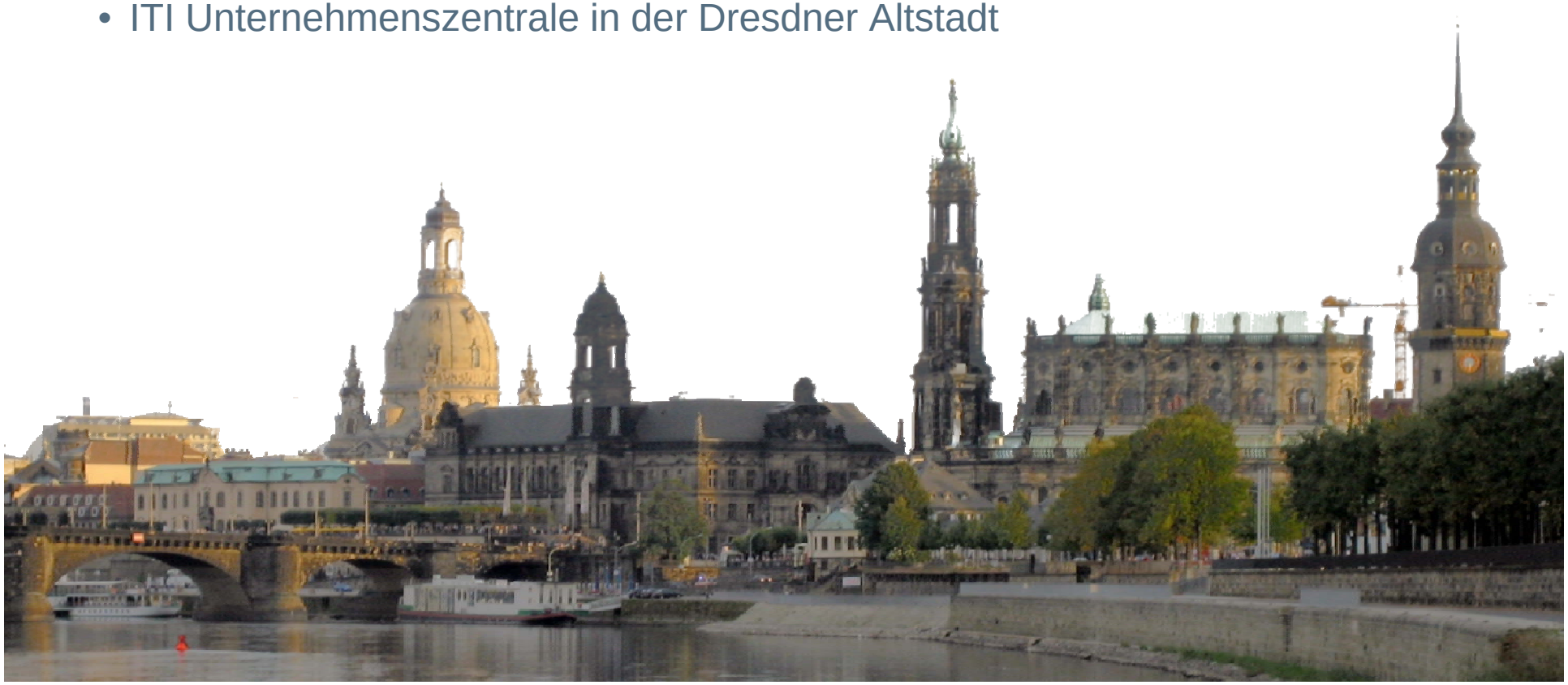
- Ziel ist die Erhöhung der Effizienz durch:
  - Parallelisierung der Entwicklung
  - Höherer Softwarereifegrad
  - Reproduzierbare und automatisierbare Tests

Agenda

1. ITI GmbH Dresden
2. Modellierung und Simulation mit SimulationX
3. Aufbau von Hardware-in-the-Loop Systemen
4. Unterstützung durch SimulationX
   a) Modellgenerierung
   b) Echtzeitfähigkeit
   c) Unterstützte Zielplattformen
5. Realisierte Projekte
   a) Putzmeister, CNH Baumaschinen
   b) Schaltsimulator
6. Maschinen- und Anlagenbau
7. Zusammenfassung, Ausblick

Firmenvorstellung

- Vielseitiges High-Tech Unternehmen und Marktführer auf dem Gebiet Systemsimulation
- ITI Unternehmenszentrale in der Dresdner Altstadt



Kerngeschäft

Anbieter kompletter Lösungen in den Bereichen
Modellierung, Simulation, Analyse und Test von Systemen

a) Entwicklung von Simulationssoftware

b) Ingenieurdienstleistungen

c) Produktvertrieb

d) Produktintegration

SIMULATION X®
Powered by ITI

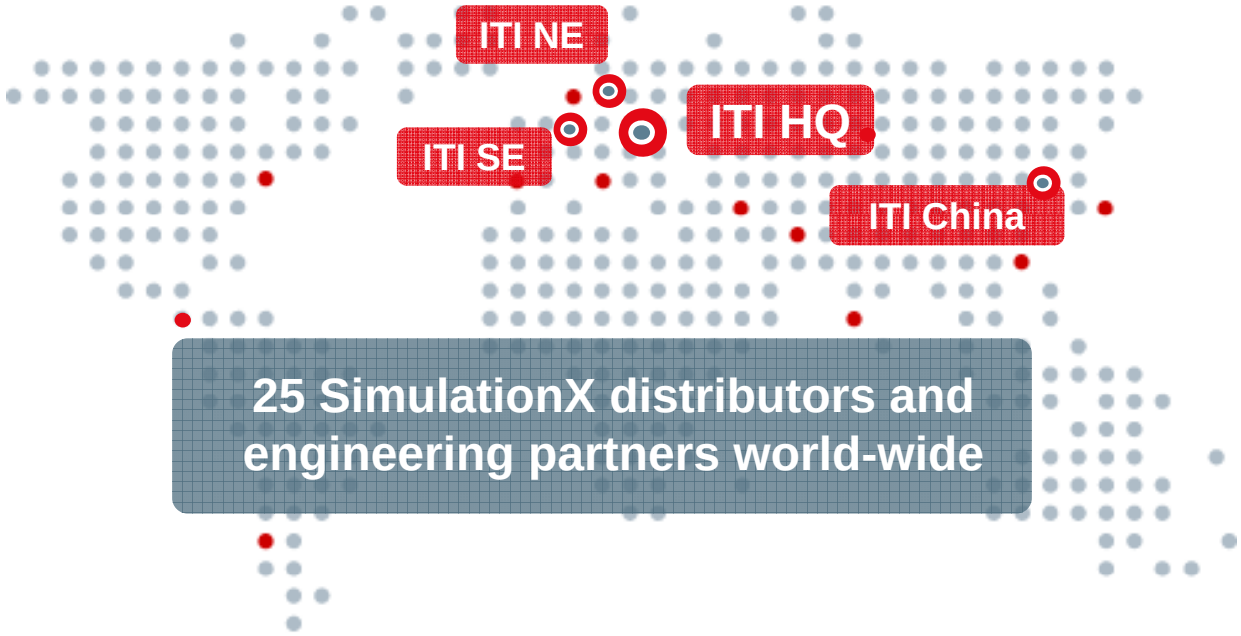
Simulation Software

Engineering

Customizing

Training & Support

Global Customer Support



25 SimulationX distributors and engineering partners world-wide

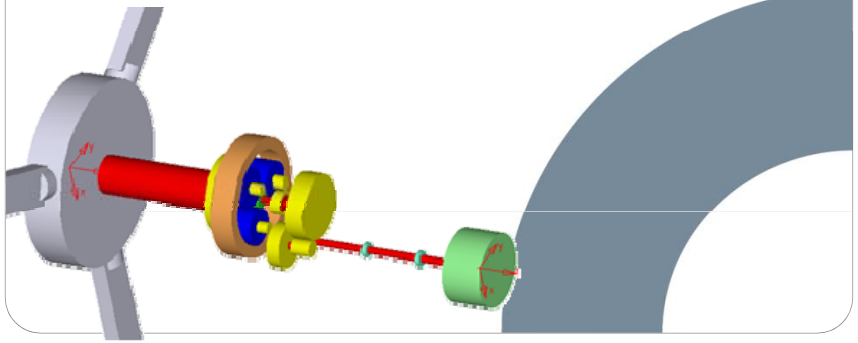
List of our Distributors

Other Countries

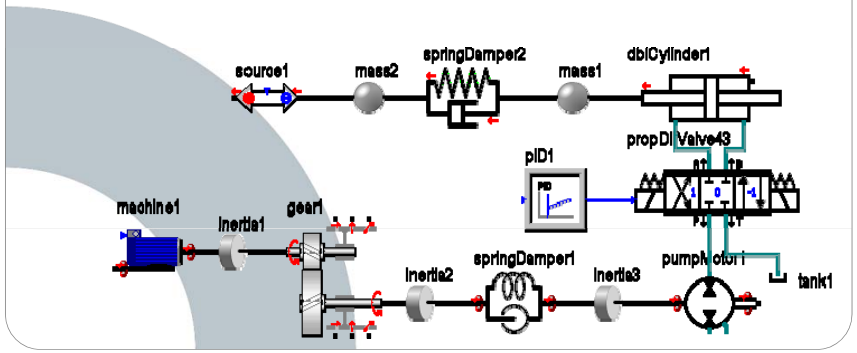
Other Countries
Belarus
Belgium
Canada
Chile
China
Denmark
Finland
France
Germany
India
Iran
Ireland
Italy
Japan
Kazakhstan
Korea
Mexico
Netherlands
Norway
Luxembourg
Pakistan
Russia
Schweden
Skandinavia
Spain
South America
Sweden
Taiwan
Ukraine
United Kingdom
USA
Vietnam

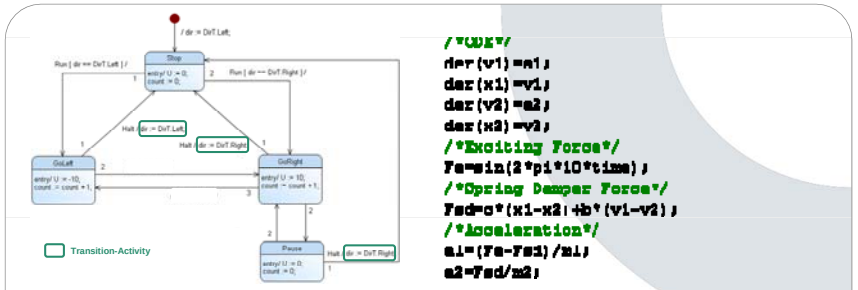
Multi Domain Modellierung und Simulation

Mehrkörpersysteme (starr, elastisch)

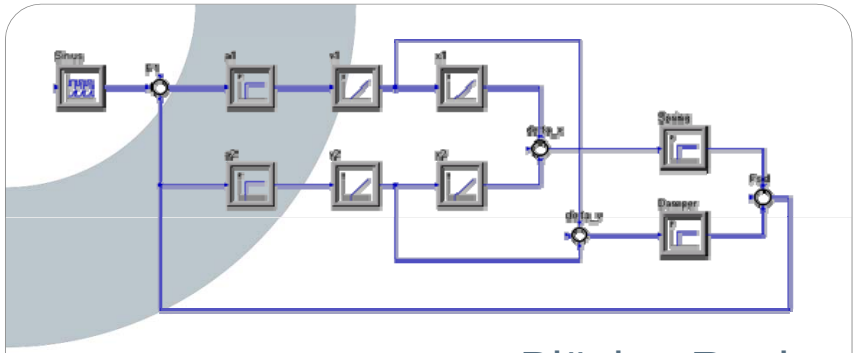


Netzwerk-Elemente





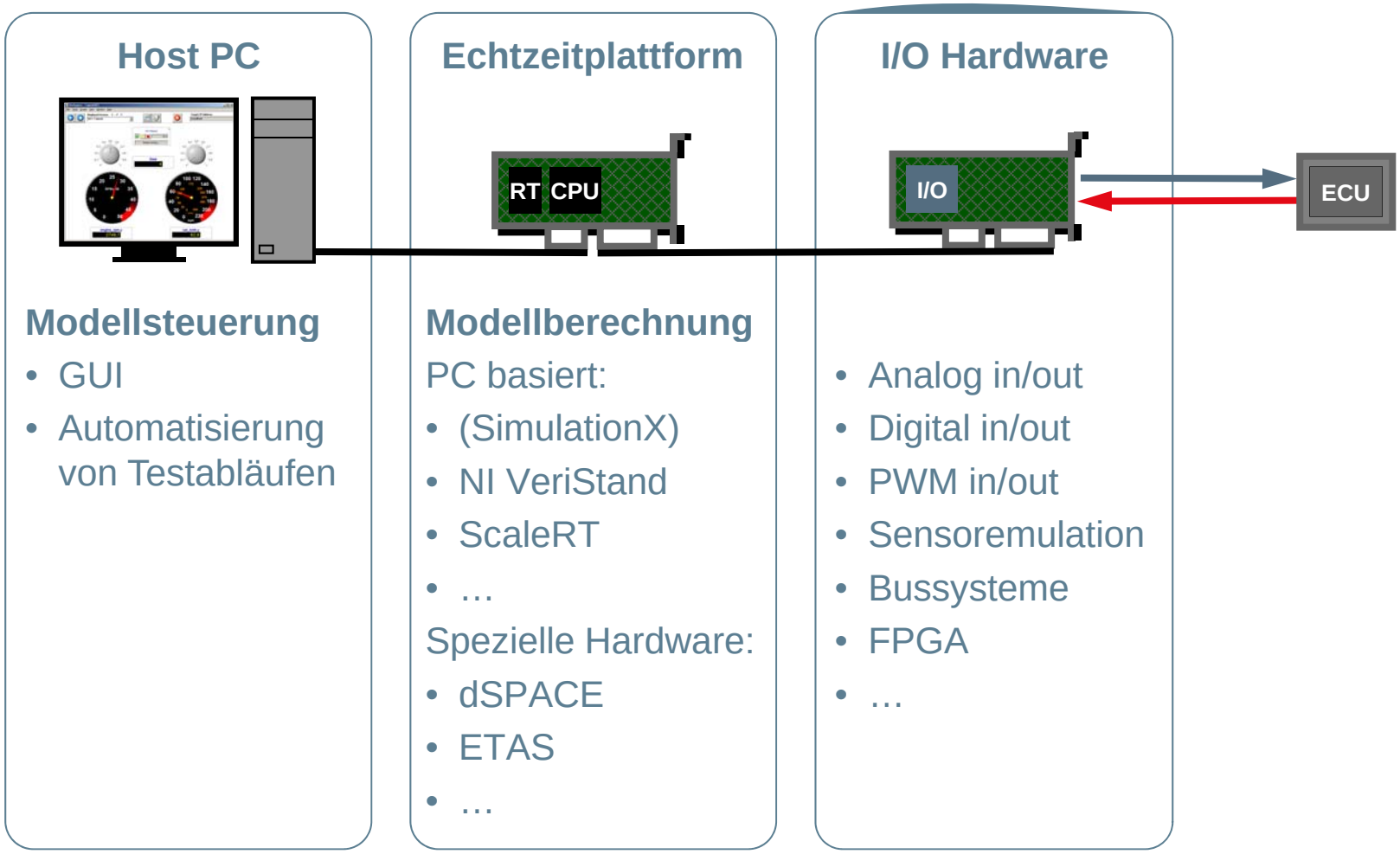
Gleichungen, Algorithmen
Modelica, Statecharts



Blöcke, Regler

- **Validierte Modellbibliotheken**
  - 25 SimulationX Standard Bibliotheken
  - Erweiterbar mit dem TypeDesigner
  - Modelica kompatibel
- **Analysemethoden**
  - Transiente Simulation im Zeitbereich
  - Lineare/Nichtlineare Analyse im Frequenzbereich
  - Lineare Systemanalyse (Eigenfrequenzen, Pol-Nullstellenplan)
- **Offen**
  - CAD Import
  - C-Code Export
  - COM-Interface, Skripting

3. Aufbau von HiL Systemen

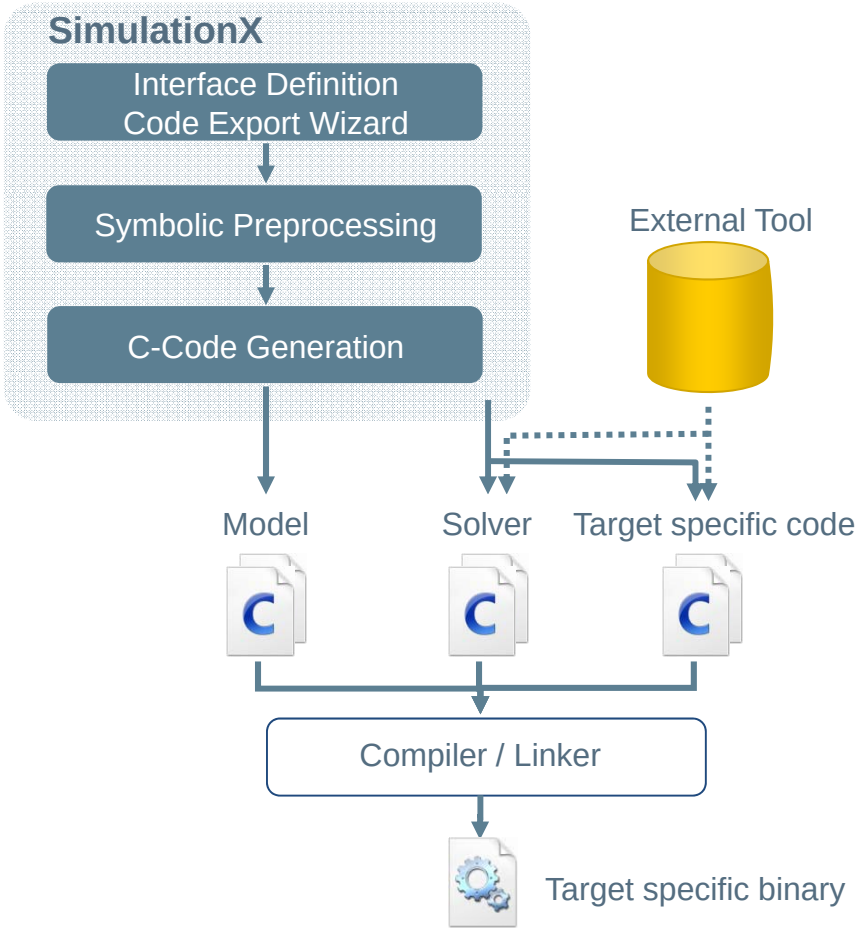


Anforderungen

- Modell und Solver aus SimulationX müssen auf der Echtzeitplattform lauffähig sein.

- Modell muss in Echtzeit berechnet werden
  - Vorhersagbare Rechenzeit
  - Rechenzeit kleiner als Abtastschrittweite

4. Modellgenerierung | Ablauf



- SimulationX Modell

```
model Model1 "2MassLibrary.ism"
    Mechanics.Translation.Mass Mass1(m=2);
    Mechanics.Translation.Mass Mass2;
    Mechanics.Translation.Source Force(F=sin(2*pi*10*time));
    Mechanics.Translation.SpringDamper
    Mechanics.Translation.Connection Connection2(x0=0,v0=0);
    Mechanics.Translation.Connection Connection3(x0=0,v0=0);
    equation
          connect(Connection2,Mass1.ctr1);
          connect(Connection2,SpringDamper1.ctr1);
          connect(Connection3,SpringDamper1.ctr2);
          connect(Connection3,Mass2.ctr1);
          connect(Connection2,Force.ctr2);
end Model1;
```

```
model SpringDamper
    Mechanics.Translation.Ctr ctr1;
    Mechanics.Translation.Ctr ctr2;
    _iti_parameter Real k "Stiffness";
    _iti_parameter Real b "Damping";
    Real dx "Displacement diff.";
    Real dv "Velocity diff.";
    Real Fs "Spring Force";
    Real Fd "Damper Force";
    Real Fi "Internal Force";
    equation
          dx=ctr1.x-ctr2.x;
          dv=ctr1.v-ctr2.v;
          Fs=k*dx;
          Fd=b*dv;
          Fi=Fs+Fd;
          ctr1.F=Fi;
          ctr2.F=-Fi;
end SpringDamper;
```

- Modell C-Code

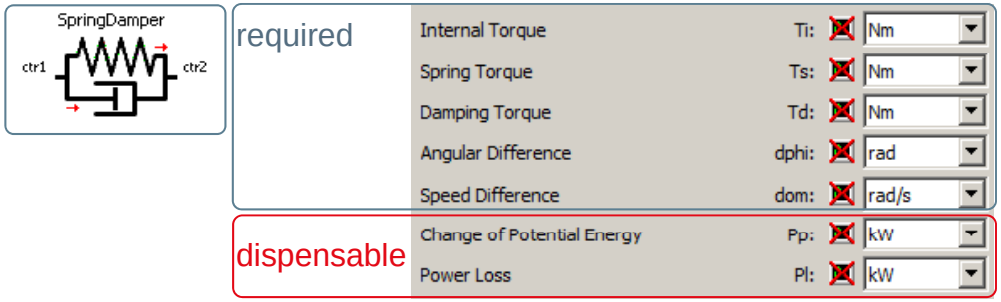
```
CalcDerivatives_Begin
    /*Transient:*/
    Force_Fi=sin(62.831853071795862*_t);
    SpringDamper1_Fs=-2000*(_Connection3_x- _Connection2_x);
    SpringDamper1_Fd=-0.1*(_der_Connection3_x- _der_Connection2_x);
    Mass1_Fa=_Force_Fi- (_SpringDamper1_Fd+_SpringDamper1_Fs);
    der_Connection3_v=_SpringDamper1_Fd+_SpringDamper1_Fs;
    der_Connection2_v=0.5*_Mass1_Fa;
    /*Additional equations*/
    dot_Connection3_x = _der_Connection3_x;
    dot_der_Connection2_x = _der_Connection2_v;
    dot_der_Connection3_x = _der_Connection3_v;
    dot_Connection2_x = _der_Connection2_x;
CalcDerivatives_End
```

Symbolische Vorverarbeitung

- Vereinfachung komplexer Ausdrücke
- Konstanten werden nur einmal berechnet
- Nicht erreichbare Alternativen werden gestrichen
- Einmalige Berechnung mehrfach verwendeter Ausdrücke
- Expansion von Matrix und Vektor Operationen und „Enrolling“ von Schleifen erlauben die Vereinfachung im Gesamtzusammenhang

Symbolische Vorverarbeitung

- Nur die erforderlichen Variablen werden berechnet



- Überführung in eine gewöhnliche Differenzialgleichung:
  - Implizite Anteile werden in lokale Gleichungssysteme überführt
  - Indexreduktion und dynamic state selection für Algebrodifferenzialgleichungen

C-Code Generierung

- Plattformunabhängiger C-Code mit definiertem Interface
- Datenzugriffe über Macros ⇨ Kein Kopieren von Daten notwendig
- Effiziente Suchalgorithmen z. B. für Kennlinien mit nicht äquidistanten Stützstellen
- Keine Speicherallokierung zur Laufzeit
- Direkte Interfaces zu verschiedenen HiL Plattformen
  - Simulink S-Function (können mit dem Real-Time Workshop weiter verarbeitet werden)
  - dSPACE Modular Hardware (DS1006)
  - CosateQ SCALE-RT
  - National Instruments VeriStand

Solver

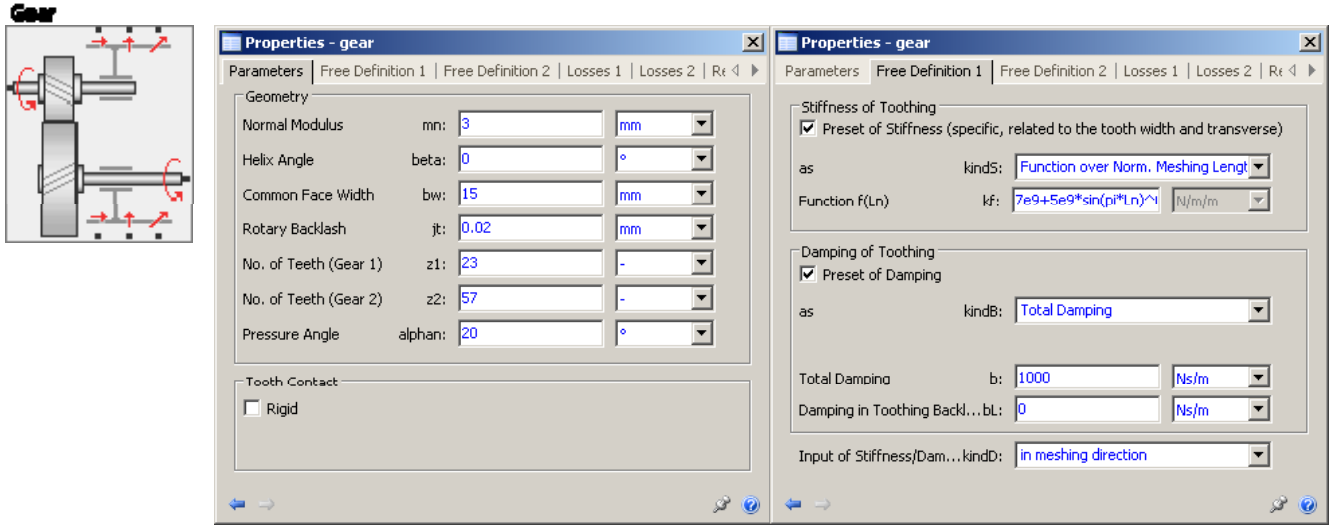
- Es können nur explizite Solver mit konstanter Integrationsschrittweite verwendet werden
- Stabilisierte ITI Solver für die direkt unterstützten HIL Plattformen
- Trennung von Integrations- und Abtastschrittweite (oversampling)

Modellreduktion

- Rechenschrittweite ist durch die Echtzeitanfordung nach unten begrenzt
  - Dynamik (Eigenfrequenzen, Zeitkonstanten) des Modells ist begrenzt
  - Nichtlinearitäten sind begrenzt
- Modellkomplexität ist durch die Rechenleistung begrenzt
- ➡ Modellreduktion ist zumeist erforderlich
- SimulationX Features und Analysemethoden geben dabei Hilfestellungen:
  - Umschaltbare Komplexität von Modellelementen
  - Lineare System Analyse
  - Performance Analyzer

Umschaltbare Komplexität

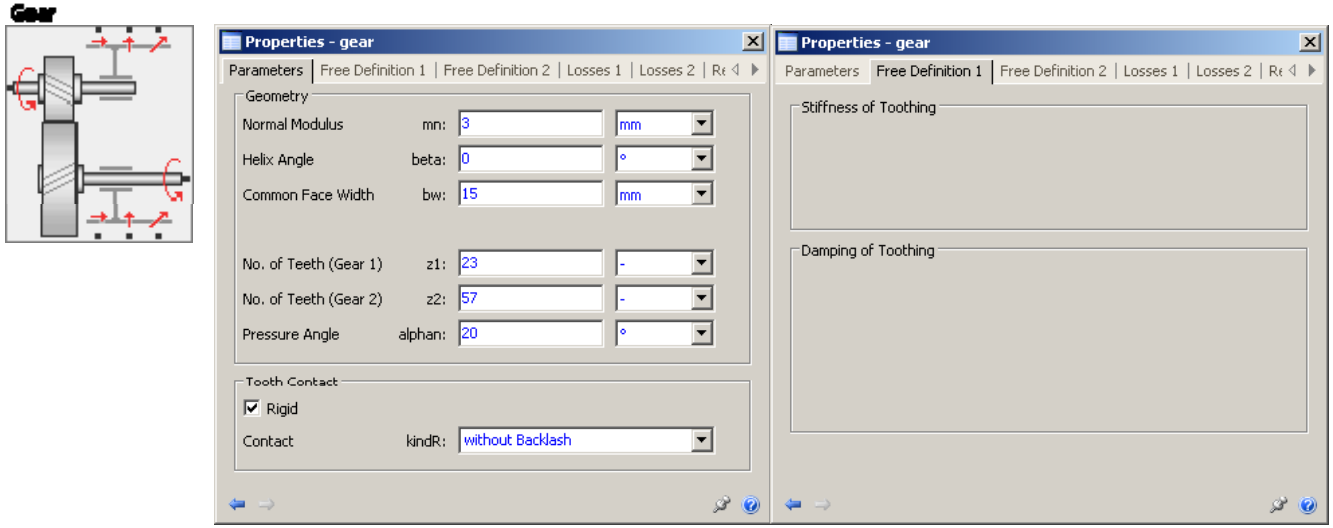
- Beispiel: Zahnradstufe



- Für Schwingungsanalysen (NVH):
  - Nicht-lineare hohe Steifigkeit der Zahnkontakte
  - Berücksichtigung des Spiels

Umschaltbare Komplexität

- Beispiel: Zahnradstufe

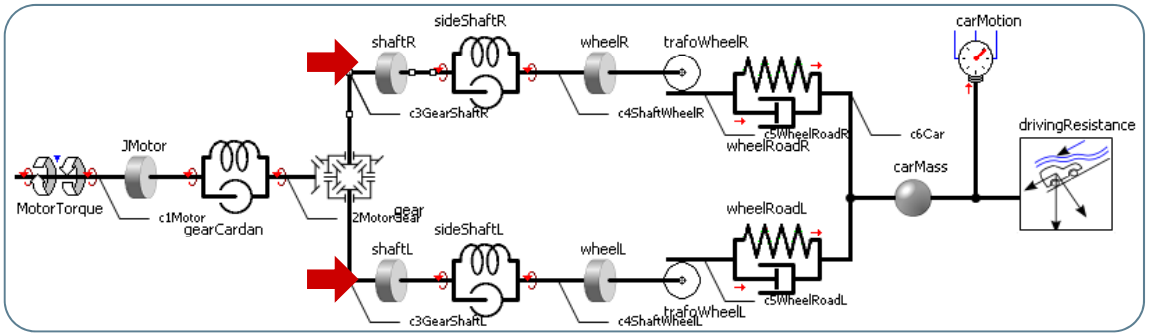


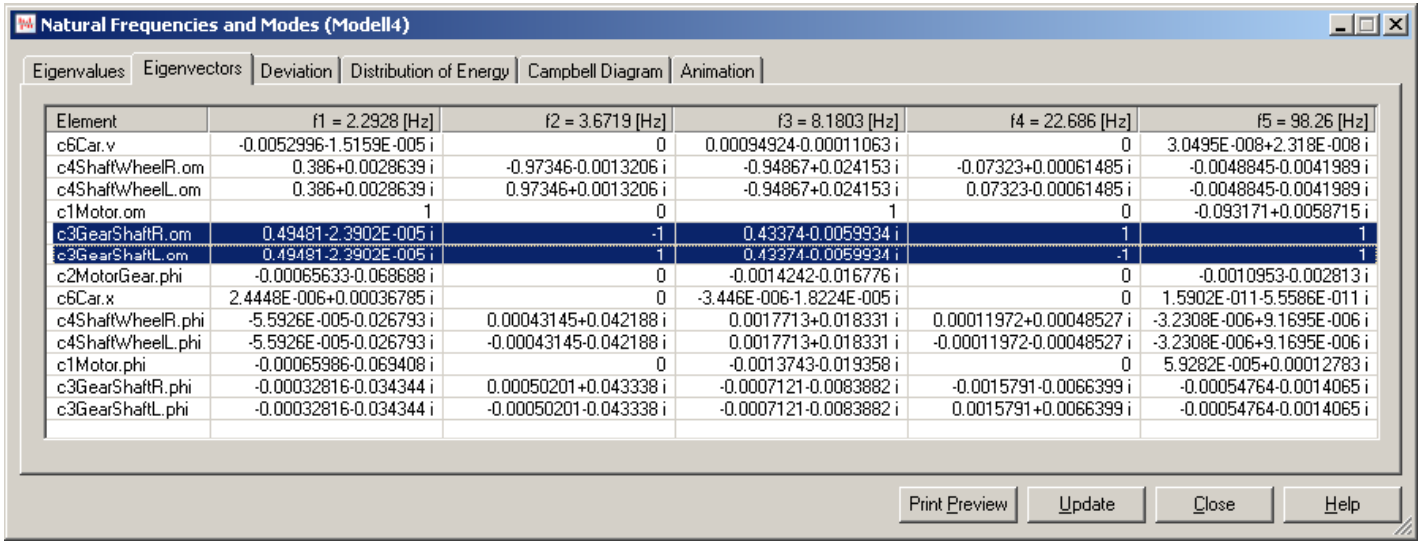
- Für Echtzeitsimulation:
  - Starr, ohne Spiel

➡ Reduktion von Dynamik, Dimension und Komplexität

Eigenfrequenzen

Identifikation von Modellteilen mit hohen Eigenfrequenzen bzw. kleinen Zeitkonstanten





Natural Frequencies and Modes (Modell4)

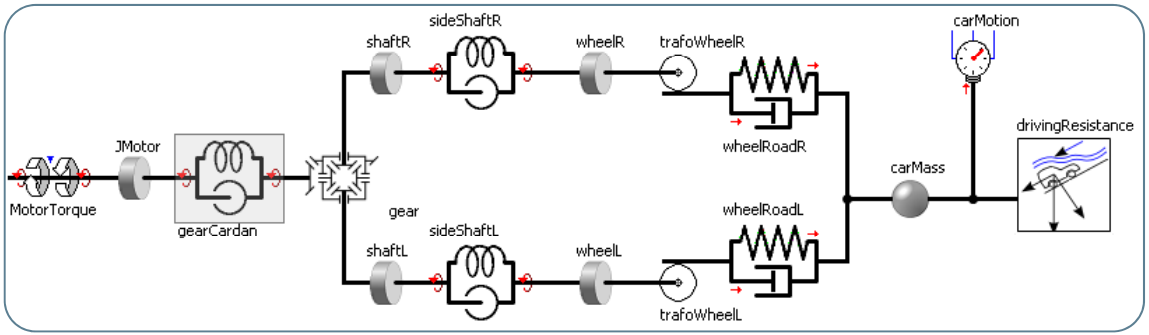
Eigenvalues | Eigenvectors | Deviation | Distribution of Energy | Campbell Diagram | Animation

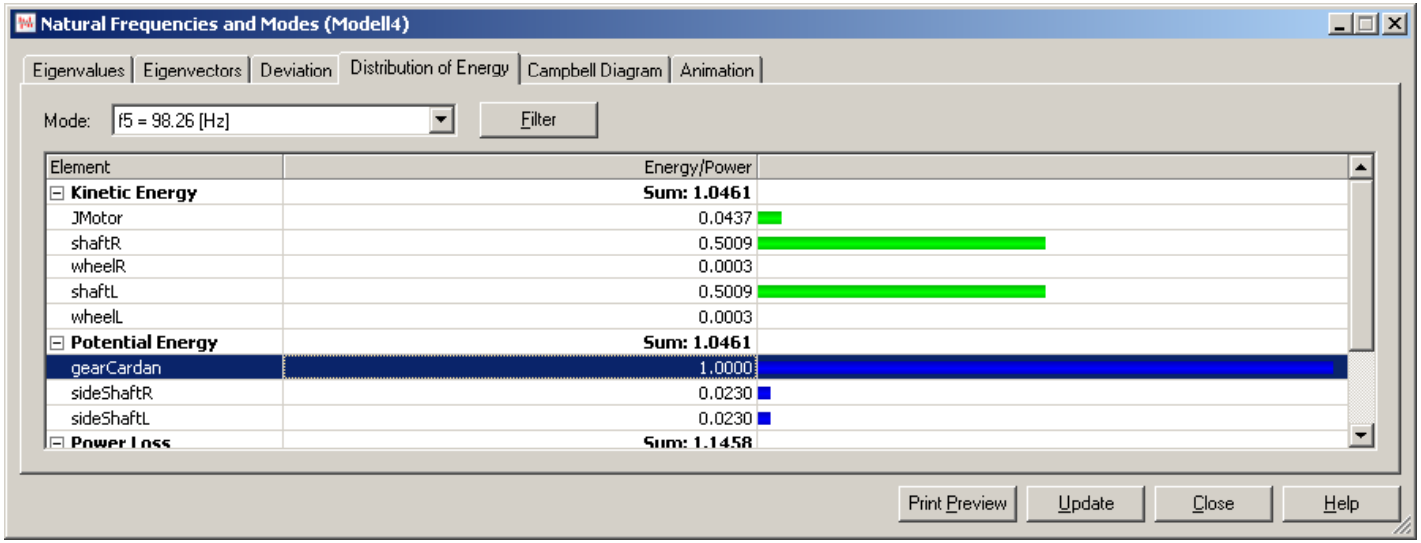
Element	f1 = 2.2928 [Hz]	f2 = 3.6719 [Hz]	f3 = 8.1803 [Hz]	f4 = 22.686 [Hz]	f5 = 98.26 [Hz]
c6Car.v	-0.0052996-1.5159E-005 i	0	0.00094924-0.00011063 i	0	3.0495E-008+2.318E-008 i
c4ShaftWheelR.om	0.386+0.0028639 i	-0.97346-0.0013206 i	-0.94867+0.024153 i	-0.07323+0.00061485 i	-0.0048845-0.0041989 i
c4ShaftWheelL.om	0.386+0.0028639 i	0.97346+0.0013206 i	-0.94867+0.024153 i	0.07323-0.00061485 i	-0.0048845-0.0041989 i
c1Motor.om	1	0	1	0	-0.093171+0.0058715 i
c3GearShaftR.om	0.49481-2.3902E-005 i	-1	0.43374-0.0059934 i	1	1
c3GearShaftL.om	0.49481-2.3902E-005 i	1	0.43374-0.0059934 i	-1	1
c2MotorGear.phi	-0.00065633-0.068688 i	0	-0.0014242-0.016776 i	0	-0.0010953-0.002813 i
c6Car.x	2.4448E-006+0.00036785 i	0	-3.446E-006-1.8224E-005 i	0	1.5902E-011-5.5586E-011 i
c4ShaftWheelR.phi	-5.5926E-005-0.026793 i	0.00043145+0.042188 i	0.0017713+0.018331 i	0.00011972+0.00048527 i	-3.2308E-006+9.1695E-006 i
c4ShaftWheelL.phi	-5.5926E-005-0.026793 i	-0.00043145-0.042188 i	0.0017713+0.018331 i	-0.00011972-0.00048527 i	-3.2308E-006+9.1695E-006 i
c1Motor.phi	-0.00065986-0.069408 i	0	-0.0013743-0.019358 i	0	5.9282E-005+0.00012783 i
c3GearShaftR.phi	-0.00032816-0.034344 i	0.00050201+0.043338 i	-0.0007121-0.0083882 i	-0.0015791-0.0066399 i	-0.00054764-0.0014065 i
c3GearShaftL.phi	-0.00032816-0.034344 i	-0.00050201-0.043338 i	-0.0007121-0.0083882 i	0.0015791+0.0066399 i	-0.00054764-0.0014065 i

Print Preview | Update | Close | Help

Energieverteilung

Identifikation der Komponenten mit dem größten Einfluss auf kritische Eigenfrequenzen.

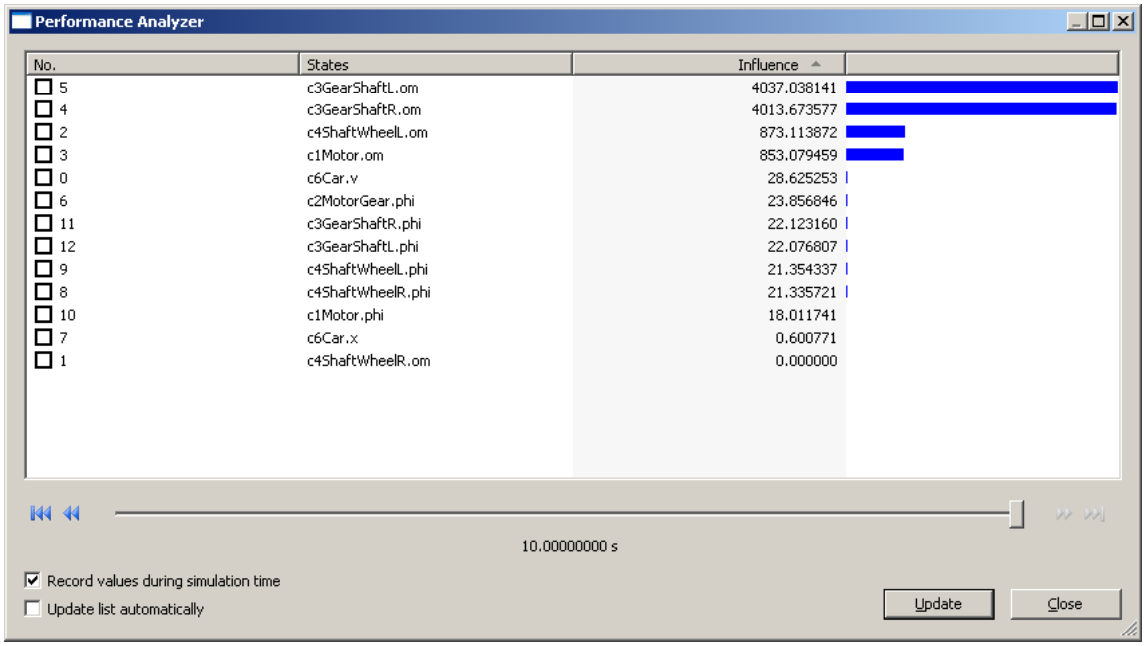




Element	Energy/Power
Kinetic Energy	**Sum: 1.0461**
JMotor	0.0437
shaftR	0.5009
wheelR	0.0003
shaftL	0.5009
wheelL	0.0003
Potential Energy	**Sum: 1.0461**
gearCardan	1.0000
sideShaftR	0.0230
sideShaftL	0.0230
Power Loss	**Sum: 1.1458**

Performance Analyzer

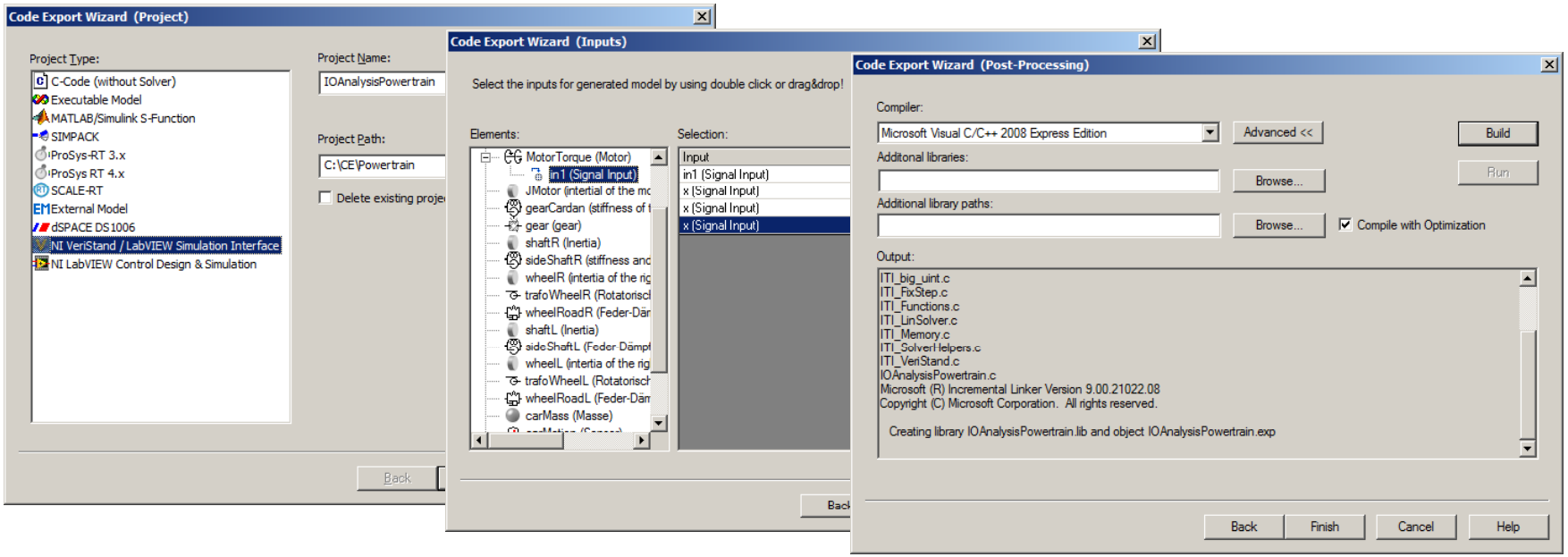
- Aufzeichnung eines Fehlerkriteriums für jede Zustandsgröße über den kompletten Simulationslauf
- Identifikation steifer Komponenten und starker Nicht-linearitäten



No.	States	Influence
5	c3GearShaftL.om	4037.038141
4	c3GearShaftR.om	4013.673577
2	c4ShaftWheelL.om	873.113872
3	c1Motor.om	853.079459
0	c6Car.v	28.625253
6	c2MotorGear.phi	23.856846
11	c3GearShaftR.phi	22.123160
12	c3GearShaftL.phi	22.076807
9	c4ShaftWheelL.phi	21.354337
8	c4ShaftWheelR.phi	21.335721
10	c1Motor.phi	18.011741
7	c6Car.x	0.600771
1	c4ShaftWheelR.om	0.000000

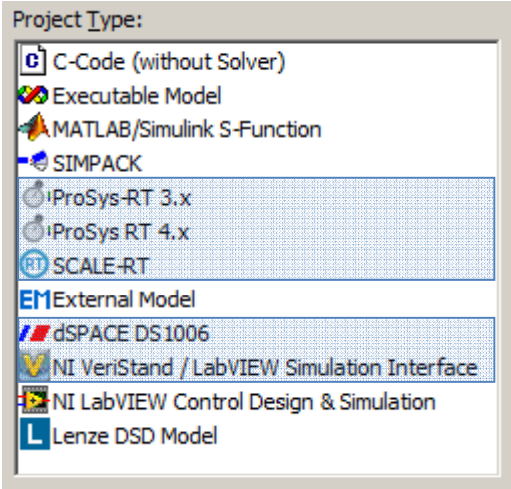
C-Code Export Assistent

- Auswahl der Zielplattform
- Definition der Eingänge, Ausgänge, Parameter
- Post processing (Compilation, Upload)



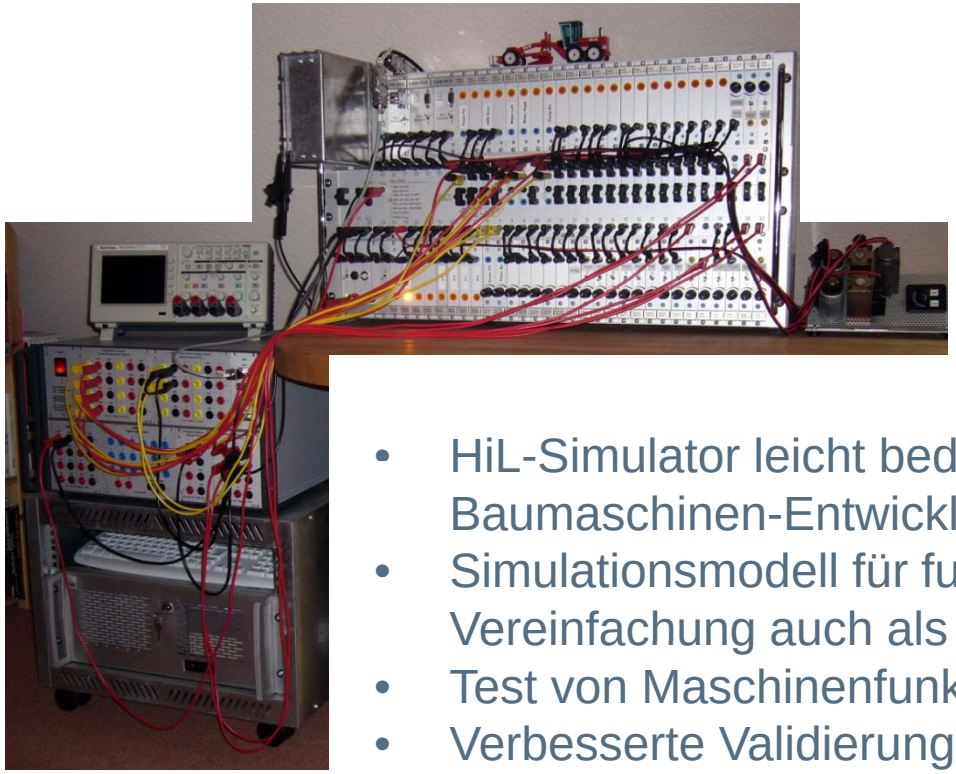
C-Code Export Assistent

- Direkte Interfaces zu verschiedenen HiL Plattformen:
  - Simulink S-Function (können mit dem Real-Time Workshop weiter verarbeitet werden)
  - dSPACE Modular Hardware (DS1006)
  - CosateQ SCALE-RT
  - National Instruments VeriStand



- Schnittstellen sind offengelegt
  - Anpassung an eigene Plattformen möglich

HiL Prüfstände für Baumaschinen



Quelle: CNH

- HiL-Simulator leicht bedienbar und effizient einsetzbar in Baumaschinen-Entwicklung
- Simulationsmodell für funktionale Analyse durch Vereinfachung auch als Echtzeitmodell verwendbar
- Test von Maschinenfunktionen
- Verbesserte Validierung durch Fehler-Antwort-Tests

Schaltsimulator für Handschaltgetriebe

- Echtzeit-Entwurfswerkzeug für den Schaltkomfort zur
  - Untersuchung von Einflussparametern
  - Verarbeitung von Ergebnisverläufen die sonst schwer messbar sind
- Ableiten des Echtzeit-Simulationsmodells aus vollständig detailliertem Antriebsstrang und Getriebemodell einschließlich externer und interner Schaltgestänge

- Sofort erlebbare Auswirkungen von Designänderungen
- Übersetzen des subjektiven Empfindens von „Nichttechnikern“ in technische Parameter
- Allgemeine Modellstruktur erlaubt Anpassung von Parametern an ähnliche Schaltmechanismen und Fahrzeuge

Quelle: ITI, Hoerbiger

Modelisar & Temo

Modelisar

- Internationales Verbundvorhaben aus 14 Partnern unter Federführung von Dassault Systemes und Daimler
- Ziel: Schaffung einer offenen SiL-Plattform
- Durch Definition eines Functional Mockup Interfaces (FMI) soll Co-Simulation zwischen Systemmodellen (beispielsweise erstellt in Modelica) und Embedded-Control-Software nach dem AUTOSAR Standard vereinfacht werden

Temo

- Forschungsprojekt aus TLK Thermo GmbH, TU Braunschweig, Visteon, Daimler und ITI
- Ziel: Bereitstellung echtzeitfähiger Modellkomponenten für Wärmeleit- und Thermofluidik-Anwendungen

ITI Virtual Machine

- SimulationX läuft in „weicher Echtzeit“ unter Windows
- Direkte Verkopplung mit SPS über OPC, Profibus, Profinet, elektrische Signale
- Oder: Simulatorkopplung mit SPS-Simulatoren (z.B. Siemens PLCSim)

- Anforderungen an die Simulationsmodelle:
  - Viele relativ einfache Komponenten (z.B. Pneumatikzylinder mit Ansteuerventilen)
  - „Intelligente“ Komponenten (z.B. Positionierantriebe)
  - Große Vielfalt von Komponentenherstellern
  - Modellerstellung = zusätzlicher Aufwand

➡ Verbundprojekt DEPROMES

Verbundprojekt DEPROMES

- Alle zur Modellerstellung notwendigen Daten werden während des Entwicklungsprozesses angesammelt.
- Daten liegen in unterschiedlichen Tools:
  - Geometrie, Abhängigkeiten: Mechanik CAD (z.B. Autodesk Inventor)
  - Elektrische, pneumatische Schaltpläne (z.B. E-Plan)
  - Kommunikation zwischen Abteilungen (z.B. Sensor-Aktor Liste in Excel)
- Struktur der Daten ist für den Bau der Maschine, nicht zur Erstellung eines Simulationsmodells ausgelegt.

➡ Integrationstool CADSIMA.

Fraunhofer IWU

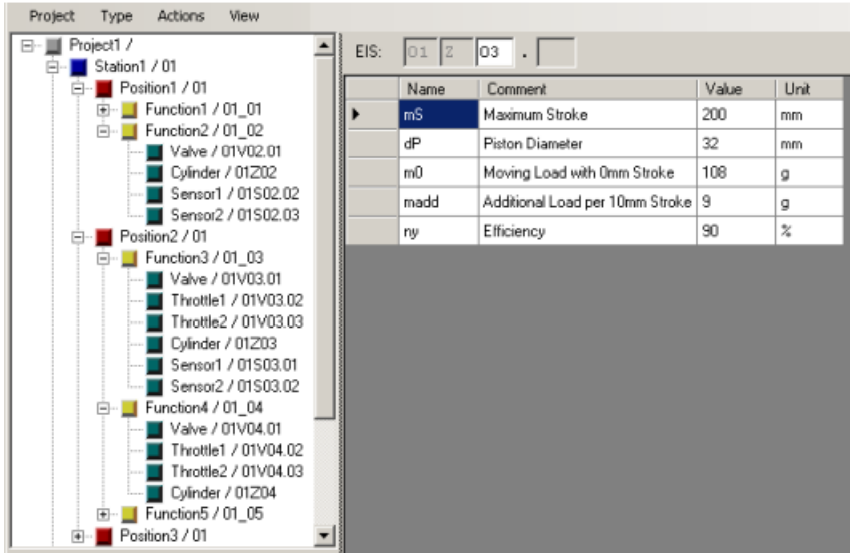
UTZ GRUPPE | USK Karl Utz Sondermaschinen GmbH

iti Supporting your visions

Europa fördert Sachsen.
EFRE Europäischer Fonds für regionale Entwicklung
Finanziert aus Mitteln der Europäischen Union und des Freistaates Sachsen

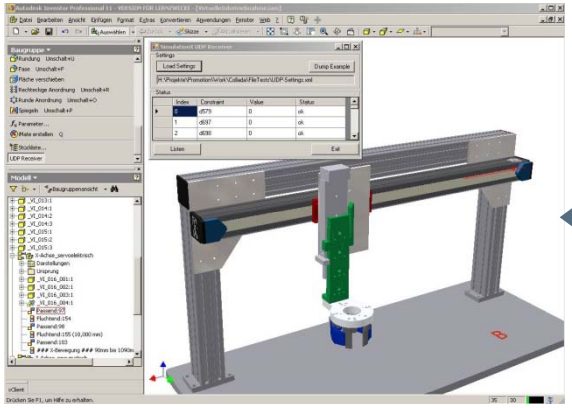
Integrationstool CADSIMA

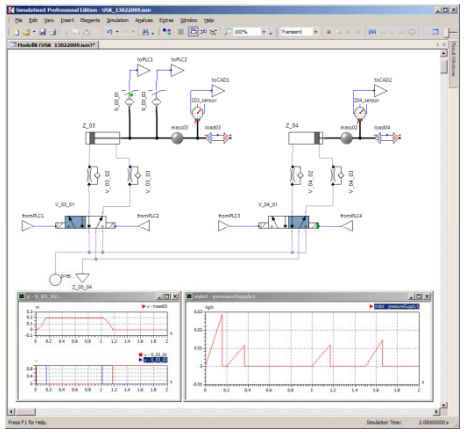
- Elektronische Form der Entwicklungs-Zuarbeit
  - Hierarchischer Anlagenaufbau
  - Sensor- Aktorliste
  - Modellparameter
  - Verweis auf CAE Dokumente



- Einsatzpotenzial
  - Konsistenztests
  - **Automatische Modellgenerierung**

Virtuelle Inbetriebnahme





Quelle: www.automation-siemens.com

Autodesk Inventor

- Animation der Maschine

SimulationX

- Virtuelle Maschine in Echtzeit oder Offline

SPS oder SPS Simulator

- Kommunikation über OPC, Profibus, Profinet oder COM

7. Zusammenfassung

- Virtuelle Inbetriebnahme verkürzt den Entwicklungsprozess und steigert die Qualität der Steuerungssoftware
- SimulationX Modelle können über C-Code Export für HiL Simulationen verwendet werden
- Modelle müssen in Echtzeit berechnet werden. Deshalb ist oftmals eine Modellreduktion notwendig.
- Modellreduktion wird von SimulationX wird unterstützt durch:
  - Umschaltbare Modellkomplexität
  - Lineare Systemanalyse
  - Performance Analyzer
- HiL Techniken sind in der Automobilindustrie weit verbreitet
- Bisher kein flächendeckender Einsatz im Maschinen- und Anlagenbau

Supporting your visions

ITI Headquarters

Webergasse 1 · Building C2
01067 Dresden · Germany

T + 49 (0) 351.260 50 - 0

www.iti.de