

Reihe 20

Rechnerunter-  
stützte Verfahren

Dipl.-Ing. Matthias Jüttner,  
Mosbach

Nr. 469

## Softwareagenten- basierte Berechnung interdisziplinärer gekoppelter Simulationen



# **Softwareagenten-basierte Berechnung interdisziplinärer gekoppelter Simulationen**

Von der Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines  
Doktor Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

**Matthias Johannes Helmut Jüttner**

aus Mosbach

Hauptberichter: Prof. Dr. techn. Wolfgang M. Rucker

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Peter Göhner

Prof. Dr. sc. techn. Jan Hesselbarth

Tag der mündlichen Prüfung: 13. November 2017

Institut für Theorie der Elektrotechnik

Universität Stuttgart

2017



# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 20

Rechnerunterstützte  
Verfahren

Dipl.-Ing. Matthias Jüttner,  
Mosbach

Nr. 469

Softwareagenten-basierte  
Berechnung  
interdisziplinärer  
gekoppelter Simulationen

VDI verlag

Jüttner, Matthias

## **Softwareagenten-basierte Berechnung interdisziplinärer gekoppelter Simulationen**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20 Nr. 469. Düsseldorf: VDI Verlag 2017.

124 Seiten, 49 Bilder, 7 Tabellen.

ISBN 978-3-18-346920-8, ISSN 0178-9473,

€ 48,00/VDI-Mitgliederpreis € 43,20.

**Für die Dokumentation:** kooperative Feldberechnung – Softwareagenten – gekoppelte Simulation – intelligente Systeme – paralleles Rechnen

Der wachsende Bedarf an interdisziplinären und gekoppelten physikalischen Simulationen auf verteilten und sich dynamisch verändernden Rechnernetzen motiviert den Einsatz des hier vorgestellten Softwareagentensystems. Die Umsetzung entspricht einer neuen Abstraktionsebene oberhalb bestehender Feldberechnungswerkzeuge und ermöglicht deren dynamisches, automatisiertes und leistungsbezogenes Zusammenwirken. Ressourcenabhängig spezialisierte Berechnungseinheiten agieren dabei autonom. Im Kollektiv ermöglichen sie die Beantwortung von Fragen, zu der Einzelne nicht fähig sind. Das System ist einfach erweiterbar und unterstützt Anwender durch intelligente Algorithmen und Erfahrungswissen z. B. bei der Konfiguration des Lösungsverlaufs und bei der Reduktion von Rechenzeit. Die kooperative Feldberechnung gelingt mittels dargestellter Schnittstellen. Herausfordernde Simulationsbeispiele belegen den vorteilhaften Einsatz dieses Systems und den so gewonnenen Mehrwert.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

D 93

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9473

ISBN 978-3-18-346920-8

<https://doi.org/10.51202/9783186469205-1>

Generiert durch IP '18.227.52.103', am 03.06.2024, 03:25:53.

Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Theorie der Elektrotechnik der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank geht an Herrn Prof. Dr. techn. Wolfgang M. Rucker für das Ermöglichen dieser Arbeit, seine vielseitige Unterstützung im Verlauf der Arbeit sowie die Übernahme des Hauptberichts.

Mein Dank gebührt ebenso Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Peter Göhner für die vielfältigen Anregungen während des Entstehens dieser Arbeit sowie die Übernahme des Mitberichts.

Herrn Prof. Dr. sc. techn. Jan Hesselbarth sei für das Ermöglichen der abschließenden Arbeiten und den Mitbericht gedankt.

Allen Kolleginnen und Kollegen gilt mein Dank für die gute Zusammenarbeit, die Unterstützung sowie die vielen hilfreichen Diskussionen.

Ebenfalls sei allen Studierenden gedankt, die im Rahmen ihrer studentischen Tätigkeit zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben und mich durch ihr Wirken in der Lehre unterstützten.

Abschließend geht mein Dank an die Familie und die vielen Freunde, die mich mit ihrer Fürsorge stets begleitet haben.

„So ist's ja besser zu  
zweien als allein.“

(Kohélet 4,9)



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassungen</b>	<b>XII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Zielsetzung . . . . .	3
1.3 Gliederung . . . . .	5
<b>2 Softwareagentensysteme</b>	<b>6</b>
2.1 Agentenorientierte Programmierung . . . . .	6
2.2 Softwareagenten . . . . .	7
2.3 Softwareagentensysteme . . . . .	9
2.4 Herausforderungen . . . . .	12
2.5 JADE . . . . .	13
<b>3 Numerische Berechnung gekoppelter Feldsimulationen</b>	<b>15</b>
3.1 Methode der finiten Elemente im Überblick . . . . .	15
3.2 Gekoppelte Simulationen . . . . .	19
3.2.1 Stark oder schwach gekoppelte Simulationen . . . . .	20
3.2.2 Zeitliche Kopplungen . . . . .	21
3.2.3 Raumbasierte Kopplungen . . . . .	22
3.2.4 Gebietskopplungen . . . . .	24
3.2.5 Methodenkopplungen . . . . .	25
3.3 Gleichungssystemlöser . . . . .	25
3.3.1 Monolithische Löser . . . . .	25
3.3.2 Gestaffeltes Lösen . . . . .	29
3.4 Berechnungsumgebungen . . . . .	31
<b>4 Softwareagenten-basierte Simulationsumgebung</b>	<b>33</b>
4.1 Systemarchitektur . . . . .	33
4.1.1 Agentenbeschreibungen . . . . .	36
4.1.2 Kommunikationsarten . . . . .	42
4.1.3 Ausführung von Verhalten . . . . .	46
4.1.4 Vererbung . . . . .	47

4.2	Numerischer Lösungsprozess . . . . .	48
4.2.1	Initialisierung und Segmentierung . . . . .	48
4.2.2	Iterative Kopplung . . . . .	50
4.2.3	Lösungsverlauf und Konvergenz . . . . .	53
4.2.4	Agentenspezifischer Berechnungsschritt . . . . .	60
4.2.5	Gebiets- und Methodenkopplung . . . . .	62
4.2.6	Umgang mit unterschiedlicher Diskretisierung . . . . .	67
4.3	Ressourcennutzung . . . . .	68
4.3.1	Agenteninterne Rechenzeitznutzung . . . . .	68
4.3.2	Rechenzeit des Agentensystems . . . . .	73
<b>5</b>	<b>Numerische Beispiele</b>	<b>76</b>
5.1	Nahbereichsradar . . . . .	76
5.1.1	Konkurrierende Wellensimulationen . . . . .	76
5.1.2	Interdisziplinär gekoppelte Simulationen . . . . .	78
5.2	Transistor . . . . .	86
5.2.1	Ortsabhängige Kopplungen . . . . .	87
5.2.2	Zeitabhängige Kopplungen . . . . .	91
<b>6</b>	<b>Resümee und Ausblick</b>	<b>95</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>98</b>

# Formelzeichen und Abkürzungen

## Lateinische Buchstaben

$A$	Magnetisches Vektorpotenzial
$a$	Ordnung der Stetigkeit
$B$	Magnetische Flussdichte
$\tilde{C}$	Adjazenzmatrix einer Kopplung
$C^a$	Stetigkeit der $a$ . Ordnung
$D$	Elektrische Flussdichte
$D_n$	Diffusionskoeffizient der Elektronenkonzentration
$D_p$	Diffusionskoeffizient der Löcherkonzentration
$\mathcal{D}$	Diskretisierung
$E$	Elektrische Feldstärke
$E$	Anzahl deformierter Referenzelemente
$f$	FEM-Energiefunktional
$G$	Matrix stationärer iterativer Verfahren
$g$	Vektor stationärer iterativer Verfahren
$h$	Elementgröße
$I$	Identitätsmatrix
$I$	Elektrischer Strom
$J$	Volumenstromdichte
$\tilde{J}$	Jacobimatrix
$j$	Komplexe Einheit
$K$	Systemmatrix
$L$	Untere Dreiecksmatrix
$M$	Massenmatrix
$N$	Fremdatomkonzentration
$N_A^-$	Akzeptorenkonzentration
$N_D^+$	Donatorenkonzentration
$N_i$	Formfunktion
$n$	Normalenvektor
$n$	Elektronenkonzentration
$n$	Frequenztransformierte Elektronenkonzentration
$n_i$	Intrinsische Ladungsträgerdichte
$P$	Permutationsmatrix
$P_e$	Péclet-Zahl

$p$	Löcherkonzentration
$\mathfrak{p}$	Frequenztransformierte Löcherkonzentration
$Q$	Orthogonale bzw. unitäre Matrix
$Q$	Punktladung
$q$	Wärmequellendichte
$R$	Obere Dreiecksmatrix
$r$	Lastvektor
$S$	Energieflussdichte
$\hat{S}$	Schurkomplement
$T$	Temperatur
$t$	Zeit
$U$	Untere Dreiecksmatrix
$U$	Elektrische Spannung
$u$	Lösungsvektor
$u$	Frequenztransformierter Lösungsvektors
$W$	Energie
$W_E$	Energie des elektrischen Feldes
$W_Q$	Energie einer Ladungsverteilung
$X$	Suchrichtungsvektor nicht stationärer iterativer Verfahren
$x$	Ortsvektor in kartesischen Koordinaten

### Griechische Buchstaben

$\alpha$	Skalierungsfaktor nicht stationärer iterativer Verfahren
$\Gamma$	Rand des Gebiets $\Omega$
$\Gamma_D$	Rand mit Dirichlet-Randbedingungen
$\Gamma_N$	Rand mit Neumann-Randbedingungen
$\gamma$	Häufigkeitsverteilung
$\delta$	Schwellwert zum Berechnungsabbruch
$\varepsilon_0$	Elektrische Feldkonstante
$\varepsilon_r$	Relative Permittivität
$\epsilon$	Fehlerschranke
$\kappa$	Elektrische Leitfähigkeit
$\kappa_t$	Thermische Leitfähigkeit
$\Lambda$	Lagrange-Multiplikator
$\mu_r$	Relative Permeabilität
$\mu_0$	Magnetische Feldkonstante
$\mu_n$	Elektronenbeweglichkeit
$\mu_p$	Löcherbeweglichkeit
$\nu$	Testfunktion

$\rho$	Volumenladungsdichte
$\sigma$	Flächenladungsdichte
$\tau$	Periode eines harmonischen Signals
$\phi$	Frequenztransformiertes elektrisches Potenzial
$\varphi$	Elektrisches Potenzial
$\varphi_i$	Ansatzkoeffizienten des elektrischen Potentials
$\Omega$	Gebiet
$\bar{\Omega}$	Gebiet außerhalb von $\Omega$
$\omega$	Betrag der Winkelgeschwindigkeit

### Symbole und Operatoren

div	Divergenz
grad	Gradient
*	Komplexe Konjugation
$\Delta$	Laplace-Operator
$\partial$	Partielle Ableitung
$\Re$	Realteil einer komplexen Zahl
$\top$	Transponierte Matrix
$\cup$	Vereinigungsmenge
$\cap$	Schnittmenge
$\approx$	Approximation
$\emptyset$	Leere Menge
$\circ$	Hadamard-Produkt
$  $	Betrag
$   $	Norm

## Abkürzungen

<b>ACG</b>	Agentenbasiertes Rechencluster (Agent-Based Computational Grid)
<b>AMS</b>	Agent Management System
<b>API</b>	Schnittstelle zur Anwendungsprogrammierung
<b>BA</b>	Berechnungsagent
<b>BDDC</b>	Gebietszerlegungsmethode (Balancing Domain Decomposition by Constraints)
<b>BDI</b>	Wissen-Wünsche-Ziele-Verhaltensmodell (Belief-Desires-Intentions behaviour model)
<b>BEM</b>	Randelementmethode
<b>BiCGStab</b>	Lösungsverfahren (Bi-Conjugate Gradient Stabilized Method)
<b>Bitkom</b>	Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.
<b>BOINC</b>	Rechencluster (Berkeley Open Infrastructure for Network Computing)
<b>CG</b>	Lösungsverfahren (Conjugate Gradient Method)
<b>CORBA</b>	Anwendungsarchitektur zur Vermittlung von Objekt-Nachrichten (Common Object Request Broker Architecture)
<b>CPU</b>	Hauptprozessor (Central Processing Unit)
<b>CT</b>	Containertabelle (Container Table)
<b>DA</b>	Dokumentationsagent
<b>DD</b>	Gebietszerlegungsverfahren (Domain Decomposition Method)
<b>DF</b>	Softwareagent (Directory Facilitator)
<b>EMV</b>	Elektromagnetische Verträglichkeit
<b>FEM</b>	Finite Elemente Methode
<b>FETI</b>	Gebietszerlegungsverfahren (Finite Element Tearing and Interconnecting)
<b>FETI-DP</b>	Gebietszerlegungsverfahren (FETI Dual-Primal)
<b>FGMRES</b>	Lösungsverfahren (Flexibel Generalized Minimal Residual Method)
<b>FIPA</b>	Gesellschaft für intelligente physikalische Agenten (Foundation for Intelligent Physical Agent)
<b>FLOPS</b>	Gleitkommaoperationen pro Sekunde (Floating Point Operations Per Second)
<b>GADT</b>	Beschreibung global ausgeführter Agenten (Global Agent Descriptor Table)
<b>GPI</b>	Programmierschnittstelle zur globalen Speicheradressierung (Global Address Space Programming Interface)
<b>GMRES</b>	Lösungsverfahren (Generalized Minimal Residual Method)
<b>JADE</b>	Agentenentwicklungsumgebung (Java Agent DEvelopment Framework)
<b>JVM</b>	Virtuelle Javamaschine (Java Virtual Machine)
<b>KA</b>	Koordinationsagent
<b>KI</b>	Künstliche Intelligenz
<b>LADT</b>	Beschreibung lokal ausgeführter Agenten (Local Agent Descriptor Table)
<b>LGS</b>	Lineares Gleichungssystem

<b>M2M</b>	Maschine zu Maschine (Machine to Machine)
<b>MG</b>	Mehrgitterlösungsverfahren (Multigrid)
<b>MpCCI</b>	Diskretisierungsabhängige Schnittstelle zur Quelltextkopplung (Mesh-based parallel Code Coupling Interface)
<b>MPI</b>	Schnittstelle zum Nachrichtenaustausch (Message Passing Interface)
<b>MUMPS</b>	Lösungsverfahren (MULTifrontal Massively Parallel sparse direct Solver)
<b>OpenMP</b>	Schnittstelle zur parallelen Programmierung (Open Multi-Processing)
<b>PARDISO</b>	Lösungsverfahren (Parallel Sparse Direct and Multi-Recursive Iterative Linear Solvers)
<b>PDE</b>	Partielle Differenzialgleichung (Partial Differential Equation)
<b>RMJ</b>	Aufruf entfernter Methoden (Remote Method Invocation)
<b>RPC</b>	Vereinheitlichter Funktions- und Methodenaufruf durch verteilte Systeme (Remote Procedure Call)
<b>SOAP</b>	Protokoll zum Datenaustausch und für Funktionsaufrufe (Simple Object Access Protocol)
<b>SOR</b>	Überrelaxationsverfahren (Successive Over-Relaxation)
<b>SORV</b>	Überrelaxationsverfahren vektoriell
<b>VDE</b>	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
<b>VDI</b>	Verein Deutscher Ingenieure
<b>VDMA</b>	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
<b>XML</b>	Erweiterbare Auszeichnungssprache (Extensible Markup Language)
<b>ZVEI</b>	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.

## Zusammenfassung

Die Notwendigkeit der Simulation interdisziplinärer und gekoppelter physikalischer Zusammenhänge auf verteilten und sich dynamisch verändernden Rechnernetzen motiviert den Einsatz des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und im Folgenden vorgestellten Softwareagentensystems. Dabei entsprechen interdisziplinär gekoppelte Systeme solchen, deren Berechnung durch ein Zusammenwirken mehrerer spezialisierter Einheiten gelingt. Beispiele stellen verschiedene sich beeinflussende physikalische Zusammenhänge dar, die sich verschiedenen Ingenieursdisziplinen zuordnen lassen. Weitere Beispiele sind sich gegenseitig beeinflussende Teilgebiete oder Zeitabhängigkeiten in einer Simulation. Die Umsetzung des Softwareagentensystems entspricht dabei der Einführung einer neuen Abstraktionsebene oberhalb bestehender Simulationswerkzeuge, die deren Zusammenwirken ermöglicht. Dazu notwendig werde eine Beschreibung der Eigenschaften und Fähigkeiten der gekapselten Simulationswerkzeuge sowie die Umsetzung von Schnittstellen zur numerischen Zusammenarbeit. Die entstehenden spezialisierten Berechnungseinheiten nutzen zur Simulation die ihnen verfügbare Soft- und Hardware und reagieren selbstständig auf bereitgestellte Zwischenergebnisse. Das so realisierte neuartige System ermöglicht es unterschiedlichen und unabhängigen Simulationseinheiten automatisiert zusammenzuarbeiten.

Die kooperative Feldberechnung gelingt durch das Bereitstellen von Randbedingungen und Quellen während der Feldberechnung sowie durch das Auslesen von Ergebnissen an beliebigen Stellen des Modells. Erforderliche Funktionen der Schnittstellen, beispielsweise zur Steuerung und Überwachung von Feldberechnungssoftware, werden hier dargestellt. Jedem Berechnungsagenten wird es so möglich, die globale Simulationaufgabe entsprechend seiner Vorstellungen eines zielführenden Lösungsbeitrags zu modifizieren. Die entstehenden Teilaufgaben werden dann angepasst auf ihre jeweiligen Anforderungen berechnet, was zu einer schnellen Lösungsbereitstellung führt.

Das vorgestellte Agentensystem ermöglicht die kollektive Bearbeitung von Aufgaben, zu der ein Einzelner nicht fähig ist. Zudem ist das dynamisch entstehende Simulationssystem einfach um Fähigkeiten und Ressourcen erweiterbar. Ein gezieltes Hinzufügen von zusätzlichen Ressourcen mit gleichen Fähigkeiten ermöglicht eine Varianz und Redundanz im Lösungsverlauf. Dabei werden existierende Teilergebnisse umgehend berücksichtigt, sodass das Agentensystem automatisiert leistungsbezogen Lösungswege vergleicht. Dies gestattet die eigenständige Konfiguration des Lösungsablaufs durch beteiligte Berechnungsagenten und den automatischen



Einsatz der zur Berechnung notwendigen Simulationswerkzeuge. Zusätzliche Ressourcen dienen dem Aufbau von Erfahrungswissen, das hier mittels eines lernfähigen Systems verwaltet und zur Reduktion benötigter Rechenzeit verwendet wird.

Bei numerischer Betrachtung entspricht der mittels Softwareagenten umgesetzte Lösungsverlauf einer gestaffelten Berechnung, die für viele gekoppelte numerische Simulationen zielführend ist. Das Einbeziehen von Agenten, deren Berechnungsfähigkeiten zur alleinigen monolithischen Berechnung ausreichen, ermöglicht eine zusätzliche konkurrierende Berechnung sowie weitere Entscheidungsoptionen in Bezug auf die Durchführung der Berechnung. Um die Autonomie der Berechnungsagenten hervorzuheben, wird auf eine zentrale Instanz während der Berechnung verzichtet. Die detaillierte Darstellung des durch Kooperation erreichten numerischen Lösungsprozesses verdeutlicht zusätzlich die Funktionsweise des Agentensystems.

Die Berechnung herausfordernd ausgewählter Simulationsbeispiele belegt, dass die kooperative Berechnung interdisziplinärer gekoppelter Simulationen durch autonome Berechnungseinheiten in verteilten Systemen auch für verschiedene Diskretisierungen gelingt. Zudem veranschaulichen die Beispiele den durch die agentenbasierte Herangehensweise gewonnenen Mehrwert, wie beispielsweise seine Flexibilität und Zuverlässigkeit. Im Hinblick auf die Verwaltung der zur Simulation notwendigen Infrastruktur gelingt die automatisierte Nutzung von auf die betrachtete Simulation angepassten und befähigten Ressourcen. Die durchgeführte Rechenzeitauswertung und die Betrachtung der Ressourcennutzung demonstrieren die Leistungsfähigkeit des realisierten Systems für unterschiedliche Kopplungen.

Das vorgestellte Agentensystem unterstützt dabei Anwender, die Simulationen zur Produktgestaltung verwenden. Beispiele dafür stellen die Konfiguration der Randbedingungen zur Kopplung von Simulationen, die dynamische Anpassung der Lösungssequenz an verfügbare Rechenressourcen oder die intelligente Entscheidung der Softwareagenten für ein Lösungsverfahren dar. Entsprechend ermöglicht es eine Reduktion der zur Durchführung einer Simulation erforderlichen menschlichen Arbeitszeit. Zudem unterstützt es selbst erfahrene Anwender bei getroffenen Entscheidungen bzw. bestätigt diese darin.

## Abstract

Simulating interdisciplinary and coupled equations on distributed and dynamically changing computer networks motivates the usage of a software agent system, developed and presented within this thesis. These interdisciplinary and coupled systems mean that a cooperative calculation is possible by multiple specialized units. Examples are different physics that correspond to various engineering disciplines and have an effect on each other. Other examples are different parts of a simulation model or time steps within a simulation model influencing each other. The implementation of the software agent system adds a new abstraction layer above existing simulation tools and enables its cooperation. It requires a description of the features and capabilities of the encapsulated simulation tools as well as the implementation of interfaces used for numeric cooperation. The resulting specialized calculation units' uses own hard- and software for calculation and react independently to provide partial results. The resulting novel system enables individual and independent simulation units to do cooperative work automatically.

The cooperative field calculation get possible by providing boundary conditions and coupling sources during the field calculation and extracting results at arbitrary coordinates within the simulation model. Required interface functionality, for example to the control and monitor the field calculation software, are shown here. Using these, each calculation agent gets capable of modifying the global simulation task, according to its ideas of a target-oriented solution contribution. This allows a calculation of the resulting partial tasks with respect to their needs and consequently a fast deployment of the solutions.

The introduced software agent system enables a cooperative treatment of tasks, which an individual agent is not capable of handling. In addition, the dynamically jointed simulation system is simple to extend by abilities and resources. Pointedly added additional resources with equal capabilities add variance and redundancy in the solution process. Once partial results are provided, they are taken into account by the software agent system. This enables an automatic comparison of the performance of all applied solutions strategies. It allows the involved calculation agents to alter the solution process and to apply the required simulation tools. Additional resources increase the experiential knowledge, managed here by a learning system that reduces calculation time.

The numerical analysis of the software agents based solution process corresponds to a segregated calculation method, suitable for most coupled numerical simulations. Involving agents with sufficient calculation capabilities to monolithically simulate the model add an additional compe-

titive solution strategy as well as another option for calculation. To emphasise the autonomy of the calculation agent a central instance during calculation is forewent. The detailed description of the numerical solution process achieved by the cooperating software agent system additionally highlights its workflow.

The calculation of the selected challenging simulation examples shows that the cooperative calculation of interdisciplinary and coupled simulations works for autonomous calculation units on distributed systems, even for different discretizations. The examples also show the additional benefit obtained by the software agent based approach, such as its flexibility and reliability. Even the management of required simulation infrastructure profits since only proper and versed resources are automatically used for the calculation of the considered simulation. The evaluation of the computation time and the considered resources usage demonstrates the performance of the implemented system for different couplings.

The presented software agent system supports users doing simulations for product design. Examples are the setup of boundary conditions for coupled simulations, the dynamic adjustment of the solution process to available computing resources or the intelligent decision of software agents for solution methods. Accordingly, it allows a reduction of required human working time. It also supports and encourage even trained users while solving simulations.

