

Kontaktlöser der nächsten Generation

Rechengenauigkeit und Performance auf einem neuen Level

Dipl.-Ing. **M. Ast**, INTES GmbH, Stuttgart;
Dr. rer. nat. **S. Hieber**, INTES GmbH, Stuttgart;
Dr.-Ing. **M. Klein**, INTES GmbH, Stuttgart;

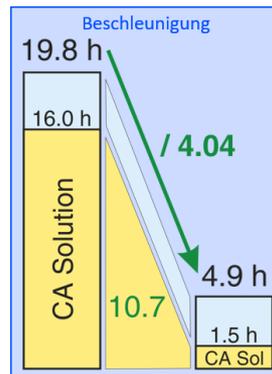


Bild 1: Algorithmische Verbesserungen führen zu einem Performancesprung

Kurzfassung

In der virtuellen Produktentwicklung ist die Finite-Elemente Analyse zur Festigkeitsberechnung weithin etabliert. Die nichtlineare Kontaktanalyse wird dabei zur realistischen Abbildung von Bauteilverbindungen eingesetzt.

Die Forderung nach durchgängig hoher Genauigkeit und weitestgehender Automation der Vernetzung führt zu sehr feinen Netzen mit vielen Unbekannten. Daraus folgt eine große Anzahl an Freiheitsgraden, die bei der Kontaktanalyse berücksichtigt werden müssen. Für diese Freiheitsgrade ist der Anstieg des Rechenaufwand, ohne algorithmische Verbesserung, kubisch und stellt damit ein potentiell Hindernis dar.

Damit die Rechenzeiten für diese großen nichtlinearen Systeme nicht steigen, sondern gesenkt werden, wurde ein neuer Kontaktlöser entwickelt. Ziel war es den Rechenaufwand um Größenordnungen zu reduzieren. Ein vollständig neuer Multi-Grid-Ansatz wurde dazu implementiert. Ergänzt zur zusätzlichen Beschleunigung des neuen Algorithmus wurde ein Verfahren zur Aktualisierung des Cholesky-Faktors entwickelt, welches die sonst in jeder Iteration notwendige Zerlegung durch ein partielles Update ersetzt.

Die Kombination beider innovativer Verfahren führt zur drastischen Reduktion der Rechenzeit bei Modellen, welche von der Größenordnung, und damit in der Genauigkeit, weit über dem Industriestandard liegen.

Die Praxistauglichkeit und enormen Vorteile werden anhand eines Industriemodells aufgezeigt.

Die Energy Efficiency stand bei der Softwareentwicklung viele Jahre nicht im Vordergrund. Beschleunigung der Prozesse wurden häufig nur durch verbesserte Rechnerarchitekturen mit mehr Mikroprozessoren, höherem Takt, mehr Speicher und schnelleren Festplatten erreicht. Teilweise stieg der Energieverbrauch bei der Verwendung von Clustern drastisch, um Ergebnisse in kürzeren Antwortzeiten zu erhalten. Echte Innovation liefern Algorithmen, die durch neue Ideen die Rechenzeiten und damit den Energieverbrauch bei der Berechnung um Größenordnungen senken. Durch die Verkürzung der Rechenzeit können bei gleichbleibender Produktentwicklungszeit die Produkteigenschaften weiter verbessert werden. Große Innovationssprünge sind also durch algorithmische Innovationen bei der Software möglich.

Abstract

In virtual product development, finite element analysis for strength calculation is well established. The non-linear contact analysis is used for the realistic representation of component connections.

The demand for general high accuracy and extensive automation of meshing leads to very fine meshes with many unknowns. This results in a large number of degrees of freedom that must be considered in the contact analysis. For these degrees of freedom, the increase in computational effort, without algorithmic improvement, is cubic and thus represents a potential obstacle.

A new contact solver was developed so that the computing times for these large non-linear systems are reduced rather than increased. The aim was to reduce the computational effort by orders of magnitude. A completely new multi-grid approach was implemented for this purpose. In order to further speed up the new algorithm, a method for updating the Cholesky

factor was developed, which replaces the decomposition that is otherwise necessary in each iteration with a partial update.

The combination of both innovative methods leads to a drastic reduction in computing time for models that are far above the industry standard in terms of size and accuracy.

The practical suitability and enormous advantages are shown using an industrial model.

Energy efficiency was not the focus of software development for many years. Accelerated processes were often only achieved through improved computer architectures with more microprocessors, higher clock rates, more memory and faster hard drives. In some cases, the use of energy resources increased drastically when using clusters in order to obtain results with shorter response times. Real innovation is provided by algorithms that use new ideas to reduce the computing times and thus the energy consumption in the calculation by orders of magnitude. By reducing the computing time, the product properties can be further improved while the product development time remains the same. Large leaps in innovation are therefore possible through algorithmic innovations in the software.

1. Motivation

Kontakt ist allgegenwärtig in Maschinen, Fahrzeugen und Konstruktionen. Die Charakteristik von Kontakt ist die deutlichste Nichtlinearität von Strukturen, da sie binär ist: In Kontakt oder nicht, aber es gibt keinen Zustand dazwischen. Zudem kann Kontakt bei der Modellbildung nicht vernachlässigt werden, da der Einfluss auf die Ergebnisse üblicherweise maßgeblich ist. Dadurch entscheidet die Berücksichtigung von Kontakt nicht nur über Nuancen beim Ergebnis, sondern kann zu gänzlich anderen aus dem Ergebnis abgeleiteten Entscheidungen führen. Lineare Ersatzmodelle, wie die Verwendung von MPCs (Multi Point Constraints) führt bei Zugkräften zu falschen Ergebnissen. Rechenzeiten mit Kontakt sind höher als ohne, aber eine notwendige Investition.

Generell feinere Vernetzungen lösen die Spannungsergebnisse besser auf und führen damit zu besseren Detailergebnissen. Bei zu groben Netzen entstehen Zusatzaufwände für Folgeäufe mit lokal feineren Netzen, auch bei der Verwendung von Submodelltechnik. Die Automatisierung der Vernetzung führt zusätzlich zu feineren Netzen bei besserer Elementqualität, spart dabei aber deutlich an Arbeitszeit. Die Rechenzeiten für feinere Netzwerke sind deutlich höher als für grobe Netze.

In der virtuellen Produktentwicklung werden Optimierung, Sampling und Modellvarianten zur Verbesserung der Konstruktionen eingesetzt. Die Rechenzeit ist bei diesen Prozessen durch die wiederholten Analysen ein besonders kritischer Faktor. Diese exzellenten Hilfsmittel können also nur bei kurzen Rechenzeiten für Kontakt eingesetzt werden.

Für Innovationen in der virtuellen Produktentwicklung ist ein schneller und genauer Kontaktlöser unerlässlich. Algorithmische Fortschritte sind unerlässlich, da die Mikrochip Entwicklung momentan keine großen Sprünge in der Rechenzeitreduktion liefert.

2. Innovation CLF Kontaktlöser

Als Basis für Genauigkeit ist eine Voraussetzung die exakte Lösung des Kontakts. Bild 2 zeigt die Bedingungen zwischen Kontaktabstand (-spalt) und Kontaktkraft, die eingehalten werden müssen.

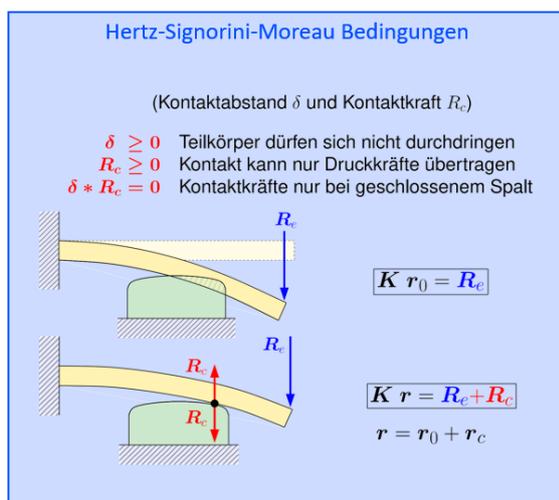


Bild 2: Kontaktmechanik Grundlagen [1]

Die Teilkörper dürfen sich nicht durchdringen, Kontakt kann nur Druckkräfte übertragen und die Verknüpfung der beiden Größen stellt sicher, dass Kontaktkräfte nur bei geschlossenem Spalt übertragen werden. Zur Lösung sind die Lagrange-Multiplier-Methoden geeignet, welche die Hertz-Signorini-Moreau Bedingungen exakt einhalten können. Penalty-Methoden sind hingegen nicht exakt, da Durchdringungen in Kauf genommen werden und im offenen Zustand Zugkräfte entstehen.

Zur Lösung in der FEM ist die Lösung für die Verschiebungen über die Steifigkeit etabliert. Für nichtlineare Systeme kann dies sowohl mit Lagrange-Multipliern oder Penalty-Ansatz erfolgen. Dieses Vorgehen hat sich durchgesetzt, da auf diese Weise gleichzeitig auch andere Nichtlinearitäten behandelt werden können. Bei Kontakt sind allerdings die primären

Unbekannten die Kontaktkräfte, nicht die Verschiebungen. Um Kräfte zu berechnen bietet sich als naheliegende Lösungsmethode die Flexibilitätsmethode an, bei der die Kräfte die primären Ergebnisse sind.

Der deutliche Vorteil dieser Methode wird durch die Kondensation vergrößert. Anstatt die Steifigkeitsmatrix als nichtlineares System durch die Kontaktfreiheitsgrade zu vergrößern (siehe Bild 3 links), wird durch Kondensation auf die Kontaktfreiheitsgrade eine um Faktoren kleinere nichtlineare Matrix erzeugt (siehe Bild 3 rechts).

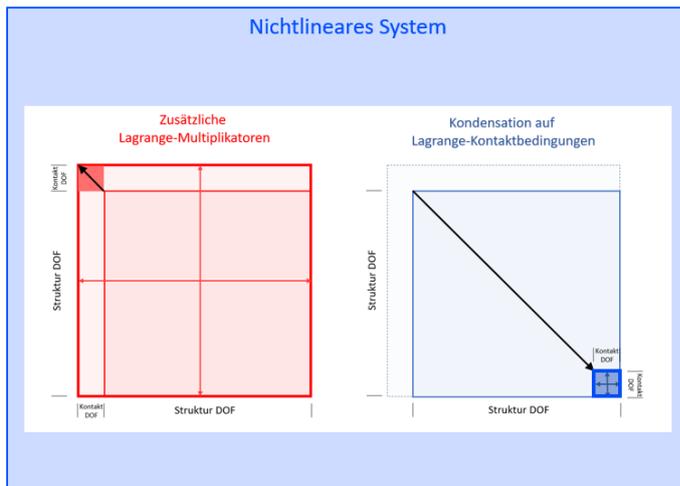


Bild 3: Nichtlineares Systemmatrizen

Durch die um Größenordnungen geringere Anzahl an Freiheitsgraden für das nichtlineare System, ist der Aufwand für die Lösung der Kontaktkräfte deutlich geringer. Die Lösung kann schneller berechnet werden.

Der Condensed Lagrange Flexibility (CLF) Löser von PERMAS [2] basiert auf diesen drei Säulen. Erstens die Kondensation auf die Kontaktfreiheitsgrade (Condensed), den exakten Kontaktbedingungen (Lagrange) und der Flexibilitätsmethode (Bild 4). Das führt folglich zu hoher Genauigkeit in Kombination mit schneller Lösungsgeschwindigkeit.

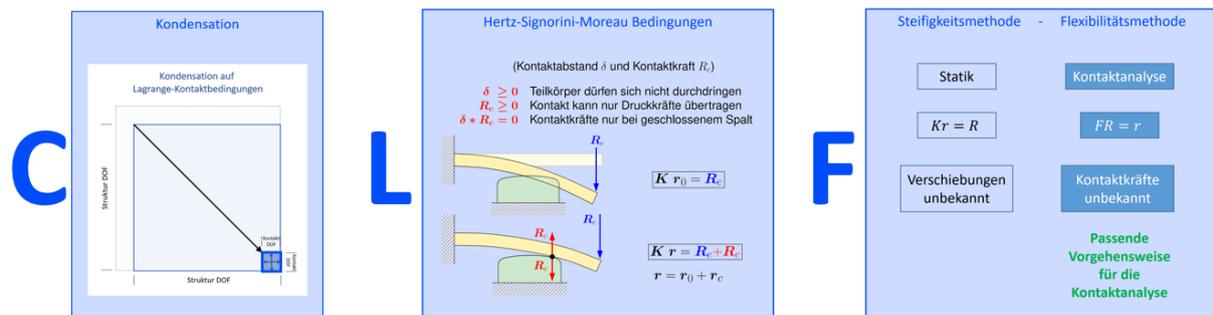


Bild 4: CLF-Löser

3. Neue Generation durch neuen Ansatz

Der schon durch seinen besonderen Ansatz sehr schnelle CLF-Löser soll für eine neue Größenordnung an Modellen nochmals beschleunigt werden. Die Kombination von unabhängigen Methoden, die beide die Anzahl der Rechenoperationen deutlich senken, bringt den gewünschten Performance-Sprung.

Ein komplett neuer Multi-Grid-Ansatz ermöglicht die hierarchische Kontaktiteration. Wie in Bild 5 gezeigt wird zunächst eine Vergrößerung der originalen feinen Kontaktfläche durchgeführt, indem durch zufällige Auswahl von Kontaktpaaren ein grober Level generiert wird.

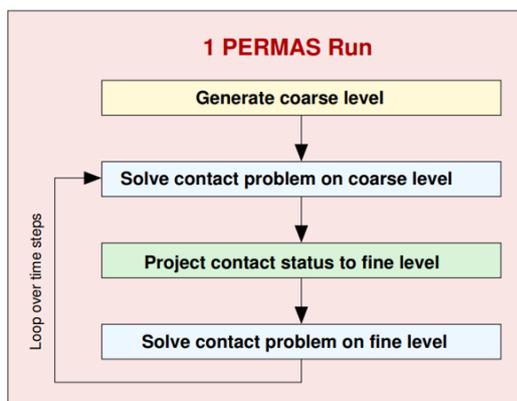


Bild 5: Multi-Grid-Ablaufdiagramm

Dann wird das Kontaktproblem auf diesem groben Level gelöst und deren Statusverteilung auf den feinen Level projiziert. Mit geringem Aufwand, da der Start durch die Projektion schon nah an der Lösung liegt, wird dann auf dem feinen Level die Kontaktlösung sehr schnell gefunden.

Zusätzlich wird der Cholesky-Faktor durch ein Update bestimmt, statt eine aufwändigere Neuzerlegung in jeder Iteration durchzuführen.

4. Genauigkeit der Kontaktlösung

Die theoretischen Ergebnisse der Hertzschen Pressung [3] sind gut für einen Vergleich mit FEM-Ergebnissen geeignet. In Bild 6 wird der Kugel-zu-Kugel-Kontakt verwendet, um die Genauigkeit des alternativen Kontaktlösers zu zeigen. Wie bei allen exakten Verfahren verbessert eine Netzverfeinerung die Qualität des Ergebnisses. Deshalb wurde zu dem zentralen Kontaktpunkt hin eine mehrstufige Verfeinerung durchgeführt. Es ergibt sich eine sehr geringe Abweichung von unter 0,05% für den maximalen per FEM gerechneten Kontaktdruck von dem theoretischen Ergebnis.

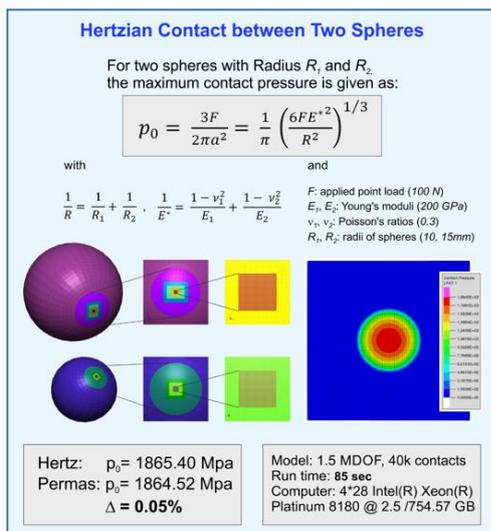


Bild 6: Vergleich FEM mit theoretischen Ergebnissen

Schon bei diesem relativ kleinen Modell mit nur 1,5 Millionen Freiheitsgraden und 40-Tausend Kontaktfreiheitsgraden zeigt der Kontaktlöser seine enorme Performance durch eine Gesamtlösungszeit von nur 85 Sekunden. Mit diesem Ergebnis ist die Genauigkeit nachgewiesen und ein erster Hinweis auf die gute Performance gegeben.

5. Performance-Beispiele anhand von Industriemodellen

Betrachtet werden soll hier die Performanceverbesserung durch den neuen Ansatz mit Multi-Grid-Lösung in Kombination mit dem Cholesky-Faktor-Update. Die Ausgangsbasis ist also schon die besonders schnelle CLF-Kontaktlösung, da der zusätzliche Vorteil durch die neue Lösergeneration gezielt verdeutlicht werden soll.

Ein industrielles FEM-Modell mit 19 Millionen Knoten, 13 Millionen Elementen (vorwiegend Volumenelemente), 56 Millionen Freiheitsgraden und 145 Tausend Knoten in Kontaktgebieten wird zum Rechenzeitvergleich genutzt. Nichtlineare Dichtungen, Schraubenvorspannung und zwei Temperaturniveaus charakterisieren zusätzliche Nichtlinearitäten des Modells. 37 Schritte mit unterschiedlichen Lasten werden gerechnet.

Zur Verfügung stand ein Rechnersystem mit zwei Xeon 6146 mit je 12 Rechenkernen + GPU (P100/16GB). Die Gesamtrechenzeit für diese Simulation wird von 19,8 Stunden auf 4,9 Stunden reduziert, also um den Faktor 4,04. Wenn man die Kontaktlösung isoliert betrachtet, denn nur diese wird von dem neuen Löser beschleunigt, liegt sogar eine Reduktion von 16,0 Stunden auf 1,5 Stunden vor. Die algorithmische Verbesserung führt demnach bei diesem FEM-Modell zu einer Beschleunigung um den Faktor 10,7. Diese Größenordnung an Beschleunigung lässt sich auf andere Weise nahezu nicht erreichen. Für die industrielle

Produktentwicklung ist von herausragender Bedeutung, dass nun zwei Varianten je Nacht gerechnet werden können, statt nur eine einzige an einem vollständigen Tag. Das bedeutet einen deutlichen Innovationsschub in den meist unveränderten oder sogar kürzer werdenden Entwicklungszeiten für eine Baugruppe.

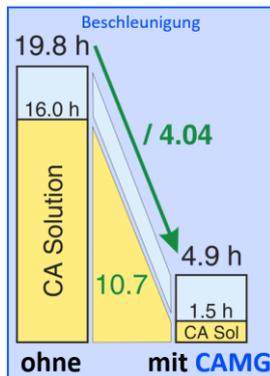


Bild 7: Vergleich der Rechenzeiten mit und ohne den neuen Löser

Ein zweites Beispiel mit anderer Charakteristik zeigt auf, dass diese Lösung universell einsetzbar ist. Diese Kontaktanalyse eines Gleichlaufgelenks, welches 600 Tausend Knoten, 500 Tausend Elemente und 1,7 Millionen Unbekannte hat wird in 122 Schritten durchgeführt. Durch das Auslenken des Gelenks um 25 Grad, Belastung mit einem hohen Drehmoment und die Rotation um 360 Grad liegt der Schwerpunkt der Simulation auf den großen Rotationen und dem Kontaktgeometrie-Update. Zu den weiteren Herausforderungen zählen die feine Auflösung der vielen Kontaktgebiete zwischen den Kugeln und den Laufbahnen außen und innen, zwischen den Kugeln und dem Käfig und zwischen dem Käfig und dem inneren und äußeren Bauteil. Durch nur ca. 5 Minuten für jeden Schritt ist mit der sehr kurze Gesamtrechenzeit von 11 Stunden auch die Randbedingung einer Simulation über Nacht erreicht worden.

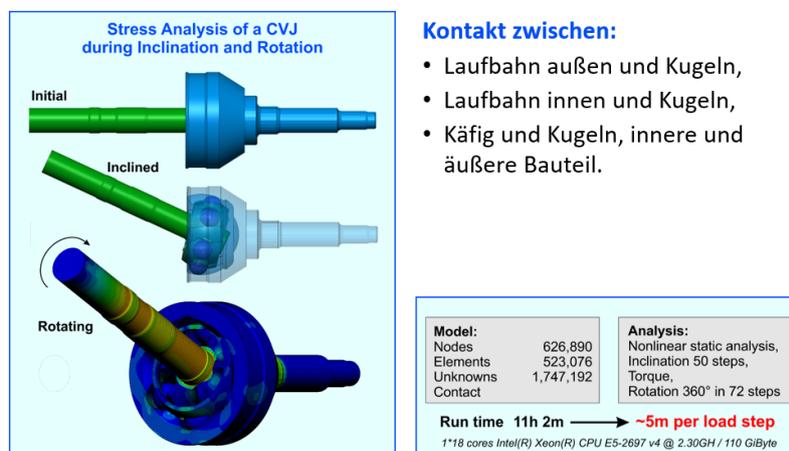


Bild 8: Simulation Gleichlaufgelenk

6. Zusätzlicher Variantenbeschleuniger

Analysen werden in der Regel mehrfach als Modellvarianten mit moderaten Änderungen durchgeführt. Modellvarianten können neue manuelle (Teil-)Konstruktionen oder Parameteränderungen durch Optimierung und Sampling sein. In der Kontaktanalyse kann der iterative Lösungsprozess drastisch verkürzt werden, wenn der Kontaktstatus am Ende einer Kontaktanalyse als Ausgangsbedingung für die nachfolgende Kontaktanalyse verwendet wird. Kontaktstatus bedeutet für jeden Kontaktknoten den Zustand in Berührung oder offen, bzw. Gleiten oder Haften bei Reibung zu kennen.

Diese Charakteristik wird durch eine Kontakt Status Datei (Contact Analysis Status File – kurz: CAS-Datei) ausgenutzt, in der diese relevanten Daten gespeichert werden. Die Dateien sind sehr klein im Vergleich zu Restart-Dateien, und können sehr flexibel eingesetzt werden, da der Anwender die Nutzung konfigurieren kann. Bild 9 zeigt die Anwendung der CAS-Methode für Modellvariantenanalyse.

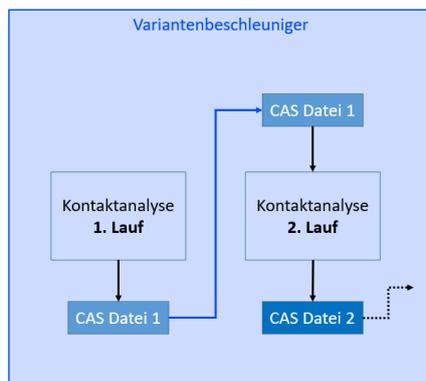


Bild 9: Prozess mit Variantenbeschleuniger

Der Grad der Ähnlichkeit hat Einfluss auf die Beschleunigung. Maximale Beschleunigung wird erreicht, wenn die bauliche Variante den Kontaktzustand nicht verändert. In Bild 10 ist ein Beispiel für die mögliche Beschleunigung durch den Variantenbeschleuniger im Detail dargestellt.

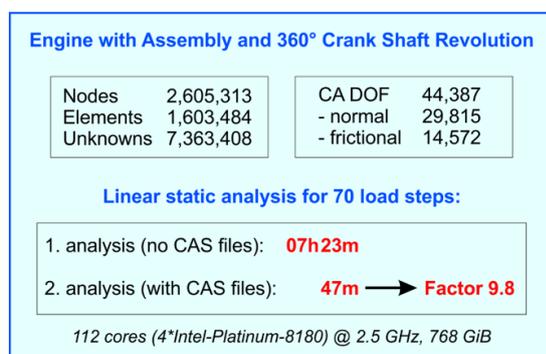


Bild 10: Beispiel Variantenbeschleunigung

Eine initial über 7 Stunden dauernde Simulation dauert mit CAS-Dateien nur 47 Minuten. Es ergibt sich eine Beschleunigung mit dem Faktor 9,8. Die CAS-Methode passt damit hervorragend in die industrielle Arbeitspraxis, in der zahlreiche Varianten während der Produktentwicklung simuliert werden müssen.

Zusätzlicher Vorteil ist, dass Optimierung und Sampling mit Kontakt stark profitieren, weil bei Optimierung und Sampling die Ähnlichkeit inhärent ist. Für diese Methoden zur Verbesserung der Bauteile kann so die entscheidende Beschleunigung erreicht werden, die diese Methoden in den vorgegebenen Entwicklungszeiträumen ermöglichen.

7. Zusammenfassung

Der FEM-Solver PERMAS hat exklusiv den CLF-Löser für Kontakt. Die Multi-Grid-Erweiterung mit Cholesky-Update beschleunigt zusätzlich große Kontaktsysteme. Für die Anwendung bei der Variantenanalyse gibt es die praxisgerechte Methode des Variantenbeschleunigers mit CAS-Dateien.

Die Kontaktlöser-Entscheidung zwischen Genauigkeit (Lagrange) und Geschwindigkeit (Penalty) ist durch den neuen Löser überflüssig. Der Zielkonflikt wurde durch die neue Generation des Kontaktlösers in PERMAS aufgelöst, ein Kompromiss ist nicht mehr notwendig. Bild 11 zeigt die Einordnung des CLF-Ansatzes in einem Geschwindigkeits-Genauigkeits-Diagramm.

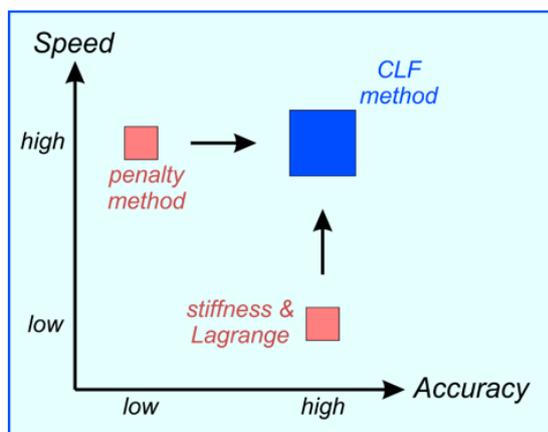


Bild 11: Einordnung Geschwindigkeit und Genauigkeit

Die CLF-Methode ist nicht nur exakt, sondern auch sehr schnell. Sie ist vollständig parallelisiert und ermöglicht lineare Analysen mit nichtlinearem Kontakt. Komplexere Aufgabenstellungen mit großen Rotationen und Kontaktgeometrie-Update gehören ebenfalls zum Funktionsumfang. Die Entwicklung der neuen Generation des Kontaktlösers kann folglich als sehr erfolgreich bezeichnet werden. PERMAS CLF mit CAMG liefert hohe

Genauigkeit in Kombination mit kurzen Antwortzeiten. Die Anforderungen der Industrie werden vollständig erfüllt.

- [1] Peter Wriggers (2006). Computational Contact Mechanics. Springer. P. 71.
- [2] PERMAS: www.intes.de, info@intes.de
- [3] H. Hertz (1881). Über die Berührung fester elastischer Körper.