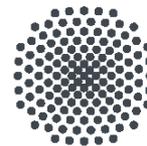

BERÜHRUNGSLOSE CHARAKTERISIERUNG ELEKTRISCHER LEITUNGSSTRUKTUREN AUF BASIS VON CT-MODELLDATEN

CONTROL Eventforum 2016, Stuttgart

Dr. Julia Denecke
Jens Kühnle
Christian Jauch
Ira Effenberger

Jürgen Hillebrand
Steffen Kieß
Prof. Dr. Sven Simon



Universität Stuttgart
Institut für Parallele und Verteilte Systeme

Übersicht

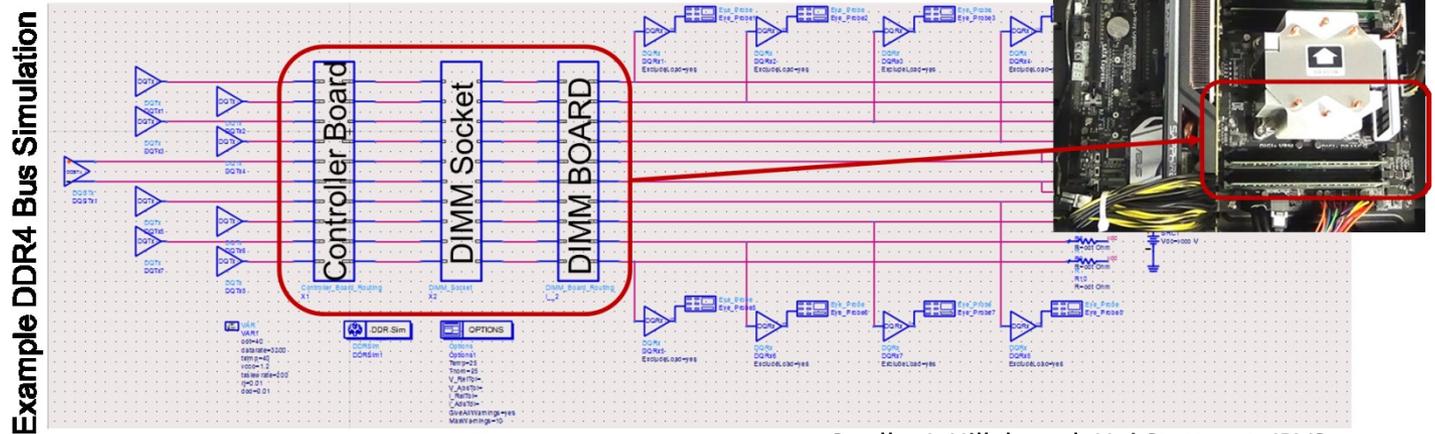
- Motivation & Ausgangssituation
- Herausforderung & Projektidee
- CT-Messtechnik
- CT-Prozesskette: Von der Datenaufnahme bis zur messtechnischen Auswertung
- Teststrukturen
- Voxeldatenverarbeitung
- STL-Datenverarbeitung & 3D-Modellerzeugung
- Elektrische Simulation
- Erste experimentelle Ergebnisse
- Zusammenfassung



Motivation & Ausgangssituation (1)

Was sind S-Parameter?

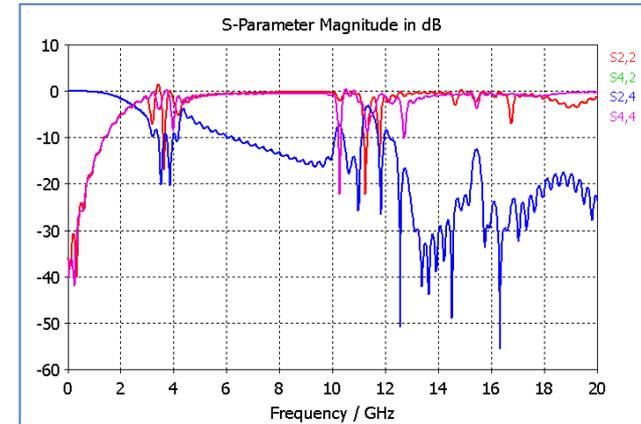
- Charakterisierung von elektrischen Leitungsstrukturen auf Basis von Transmission und Reflektion von Wellen
 - Beschreibt das Übertragungsverhalten von Schaltungen und Baugruppen (z.B. Dämpfung/Verstärkung von Signalen) als Black Box
 - Ermöglicht die getreue Abbildung des elektromagnetischen Verhaltens realer Leitungsstrukturen im Computer mittels Simulation
- ➔ Benötigt werden Verfahren zur Messung der S-Parameter einzelner Baugruppen



Motivation & Ausgangssituation (2)

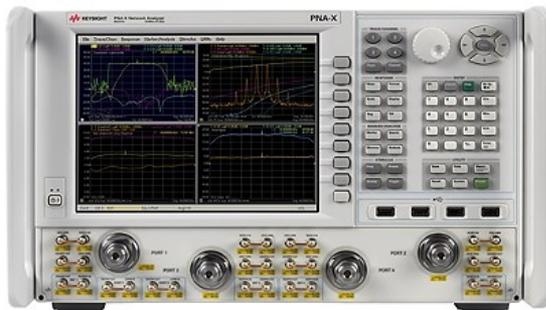
Messung von S-Parametern mittels (vektoriellem) Netzwerkanalysator (VNA)

- Device under Test (DUT) wird mit VNA verbunden und mit Messsignalen (jeweils mit bestimmter Frequenz) gespeist
- Gemessen werden Änderungen des Messsignals an Ein-/Ausgangstoren (Amplitude und Phase)
- Darstellung der Transmission und Reflektion in kartesischem Scatter- bzw. Smith-Diagramm

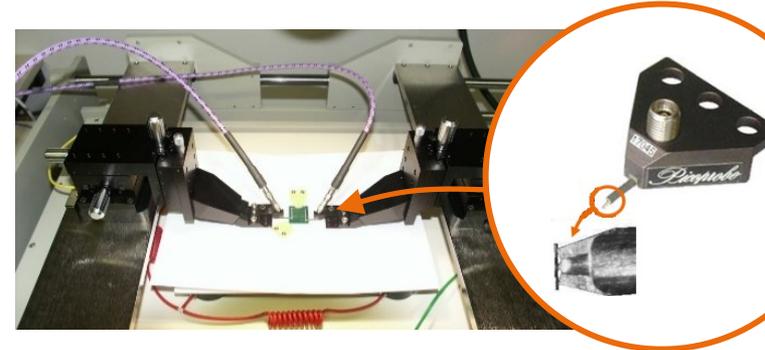


Scatter Diagramm

Quelle: J. Hillebrand, Uni Stuttgart, IPVS



PNA Network Analyzers
Quelle: www.keysight.com

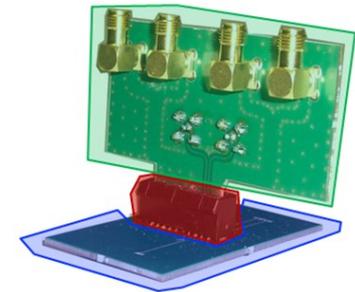


Taster Picoprobe
Quelle: www.picoprobe.com

Herausforderung & Projektidee

Herausforderung der VNA-Messtechnik

- Abmessung der Schaltungen bzw. Baugruppen im mm/cm Bereich (Größenordnung der Wellenlänge)
- Steigende Integrationsdichte, Multilayer-Boards
- Anschluss bei unzugänglichen Strukturen i.d.R. nicht möglich
- Meist sind speziell gefertigte Testvorrichtungen und Steckverbinder nötig; DUT wird nicht direkt gemessen
- Aufwendig und teuer



Testvorrichtung mit PCI-Stecker
Quelle: J. Hillebrand, Uni Stuttgart, IPVS

Projektidee: CT-basierte elektrische Charakterisierung von Multi-Gigabit-Leitungsstrukturen

- Entwicklung eines neuen Verfahrens zur berührungslosen und breitbandigen Bestimmung von elektrischen Parametern (insb. von S-Parametern) auf Basis von Computertomographie (CT) Daten
- Proof-of-Concept und Realisierung eines ersten Demonstrators
- Gemeinsames Forschungsprojekt mit Uni Stuttgart, IPVS

GEFÖRDERT VOM



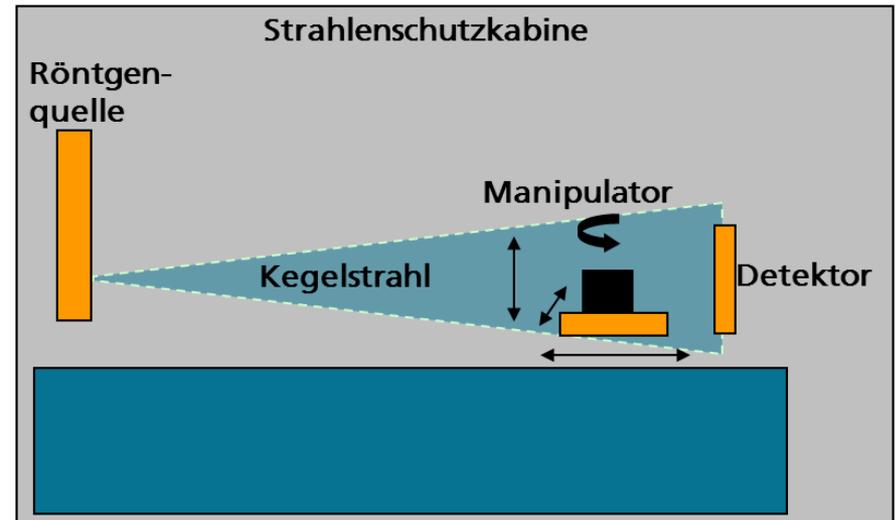
Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

CT-Messtechnik

Funktionsprinzip:

- Durchstrahlung eines Bauteils mit Röntgenstrahlen
- Schwächung des Röntgenstrahls (Absorption)
- Wiedergabe des Objekts auf einem Detektor (2D-Röntgenbild)
- Aufnahme von Einzelbildern in allen Winkelstellungen durch Rotation des Objekts oder des Aufbaus
- Rekonstruktion zu einem Volumenbild bzw. Voxelmodells mittels gefilterter Rückprojektion

Voxel: räumliches Einzelelement
(analog zu Pixel im 2D)



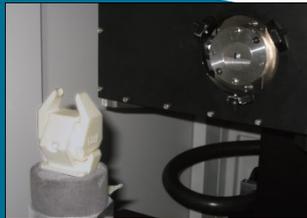
Grundlegender Aufbau eines industriellen CT-Systems

Hier verwendet:

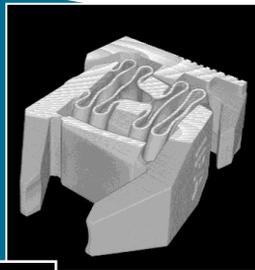
TomoScope® HV 500 der Firma Werth Messtechnik GmbH

CT-Prozesskette: Von der Datenaufnahme bis zur Messtechnischen Auswertung

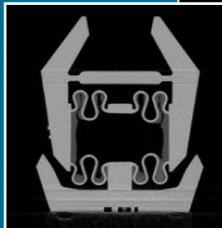
Datenaufnahme



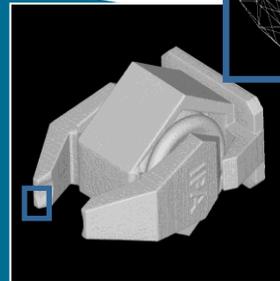
3D CT Scan



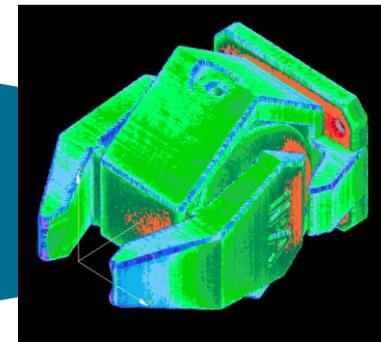
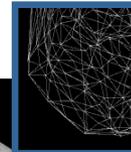
Voxelmodell



Datenauswertung



STL-Daten



Messtechnische Auswertung

Teststrukturen

Bewertung des neuen Verfahrens
mittels definierter Teststrukturen

- Streifenleitungen mit Lötverbindungen und VIAs
- Gerade und gewinkelte Streifen mit Leitungsbreiten zw. 10 und 250µm, Leitungsabständen zw. 10 und 150µm
- Multilayer-Boards
- Referenzmessung der S-Parameter mit Zweitor-Netzwerkanalysator

Aufspannvorrichtung zur Fixierung der Teststrukturen im Meßraum des CT

→ Erreichte Voxelgröße ca. 11 µm



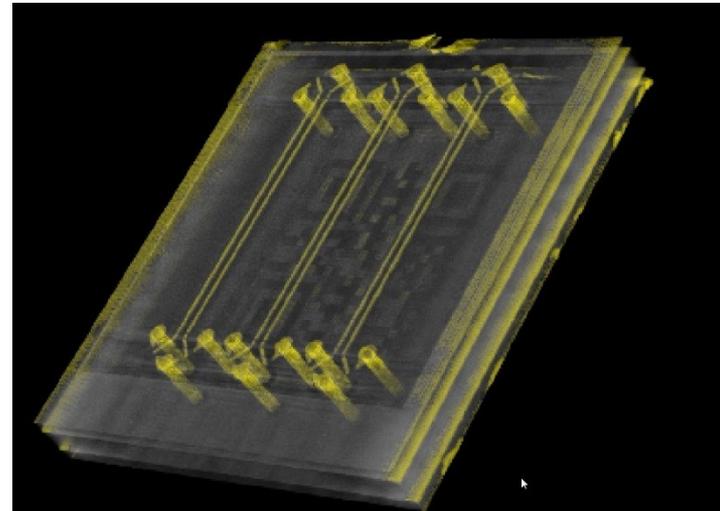
Voxeldatenverarbeitung (1)

Ziel

- Extraktion der für die Feldsimulation relevanten Oberflächen elektrischer Schaltungen und Baugruppen aus den Voxeldaten des CT-Scans
- Ergebnis als STL-Daten (Dreiecksnetz) zur Weiterverarbeitung bereitstellen
- Entfernen von nicht relevanten Messwerten, welche keinen Einfluss auf die Parameterberechnung der elektromagnetischen Feldsimulation haben

Herausforderung

- Multimaterialmix des CT-Scans: Grauwertbereiche von Schaltungen und nicht relevanten Messwerten überschneiden sich
 - Extraktion mit globalem Schwellwert nicht möglich
- CT-Daten beinhalten sehr feine Strukturen bei sehr kleiner Auflösung



Voxeldatenverarbeitung (2)

Bisher:

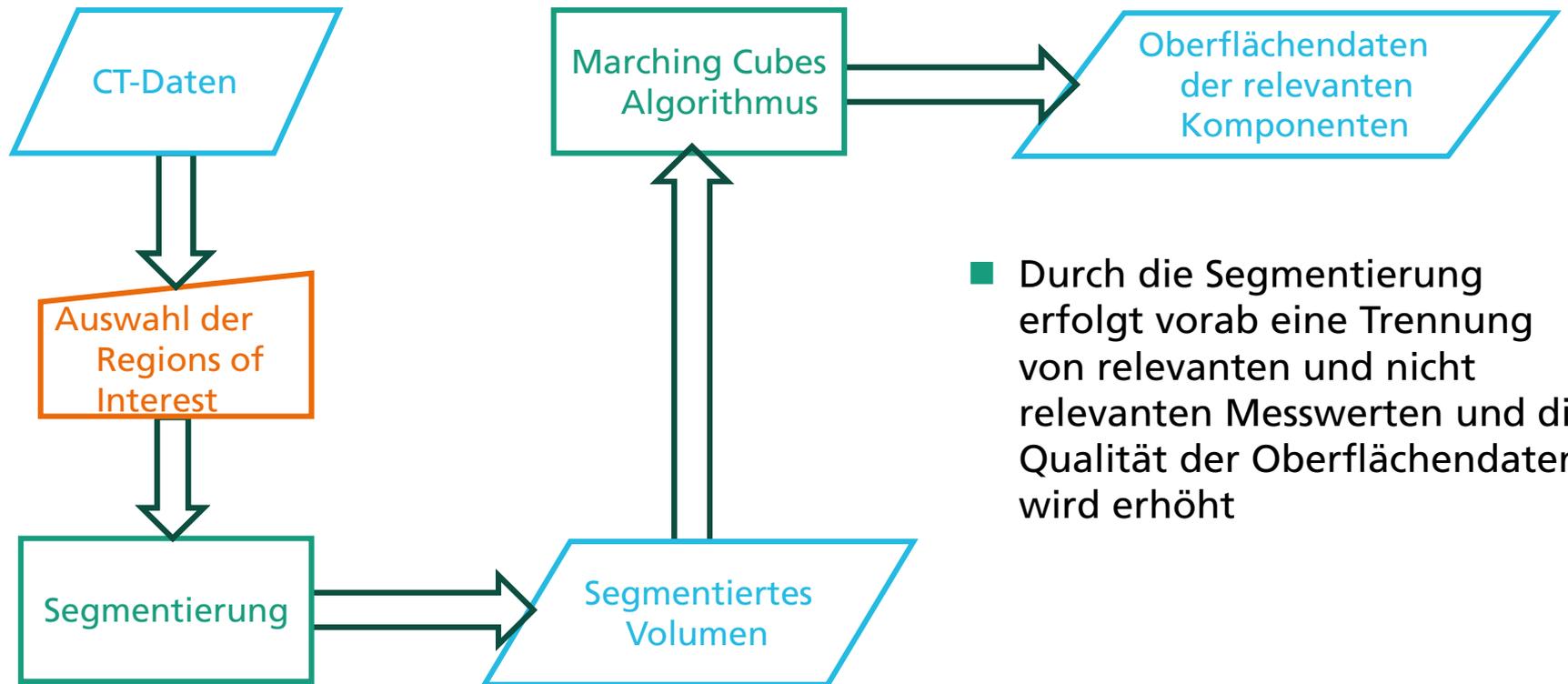


Ansatz

- Segmentierung der Voxeldaten durch händisch bestimmte Regions of Interest
- Erzeugung der Oberfläche nur mit den reduzierten Voxeldaten

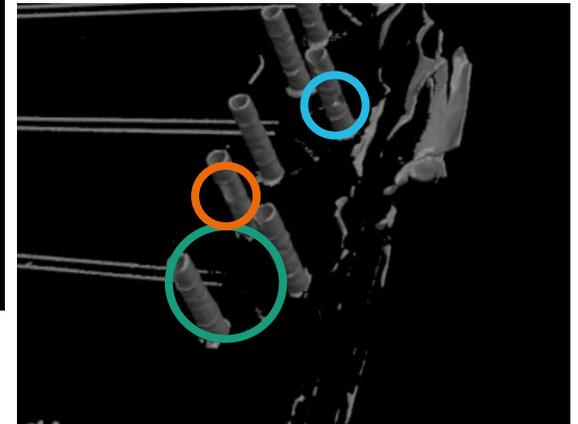
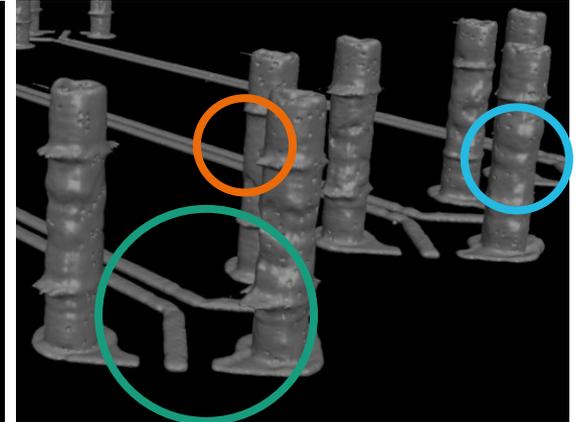
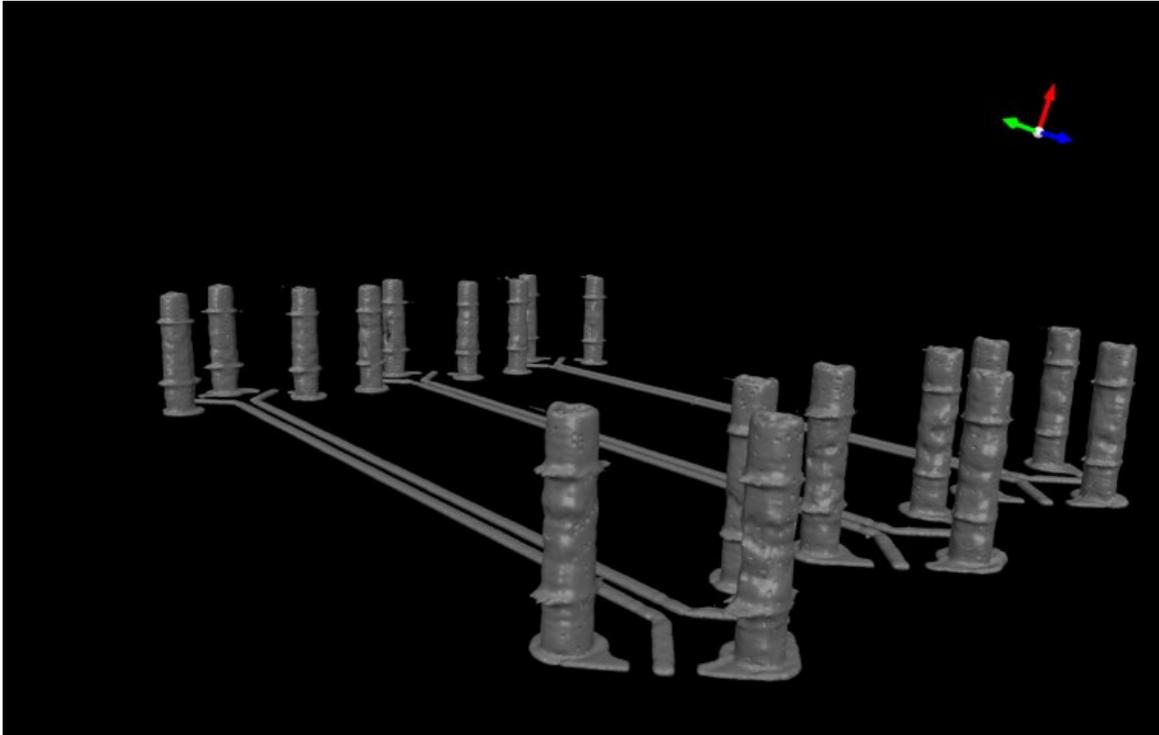
Voxeldatenverarbeitung (3)

Neuer Ansatz:



- Durch die Segmentierung erfolgt vorab eine Trennung von relevanten und nicht relevanten Messwerten und die Qualität der Oberflächendaten wird erhöht

Voxeldatenverarbeitung (4)



- Links: STL-Oberflächendaten der Schaltungen
- Rechts: Vergleich der Oberflächendaten mit (oben) und ohne (unten) vorherige Segmentierung

VoxView

- Renderer für Voxeldaten

- Features:

- Verringerung der Datenmenge durch Zuschneiden des Volumens in der Vorschau

- Schichtweise Ansicht und 3D-Ansicht des Volumens möglich

- Drehung des Volumens und Ausrichtung an einem Gitter

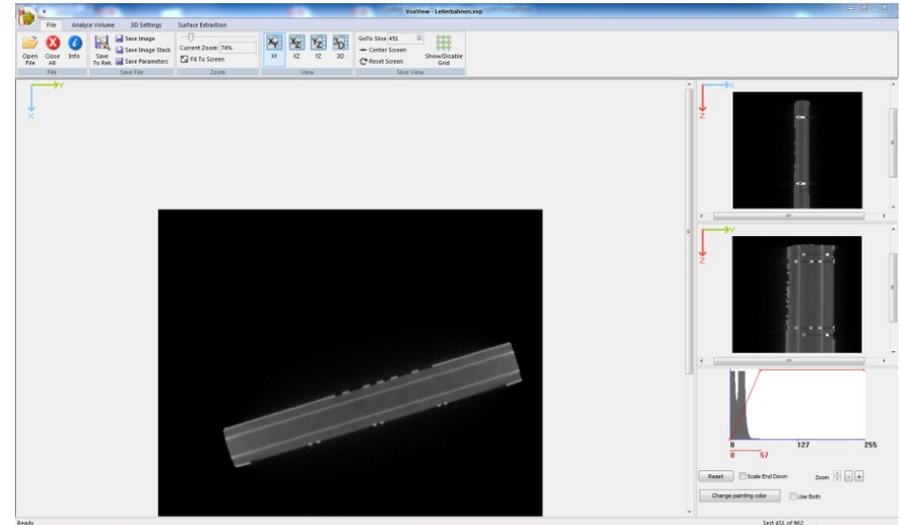
- Speichern von einzelnen Bildern, einem Bildstapel, dem gesamten Volumen oder den in VoxView eingestellten Parametern

- Analysetools:

- Segmentierung und Oberflächenextraktion

- Textur- und Faserorientierungsanalyse

- Porositätsanalyse



STL-Datenverarbeitung (1)

Ziel

- Erzeugung von geometrischen 3D-Modellen aus STL-Daten
- Insb. mittels Extraktion regelgeometrischer Strukturen
 - Kein Einfluss auf die zu berechnenden elektrischen Parameter (Abweichungen von der Größenordnung im Sub-Wellenlängen-Bereich)
 - Vereinfachung/Reduktion der Daten für elektromagnetische Feldsimulation

Herausforderung

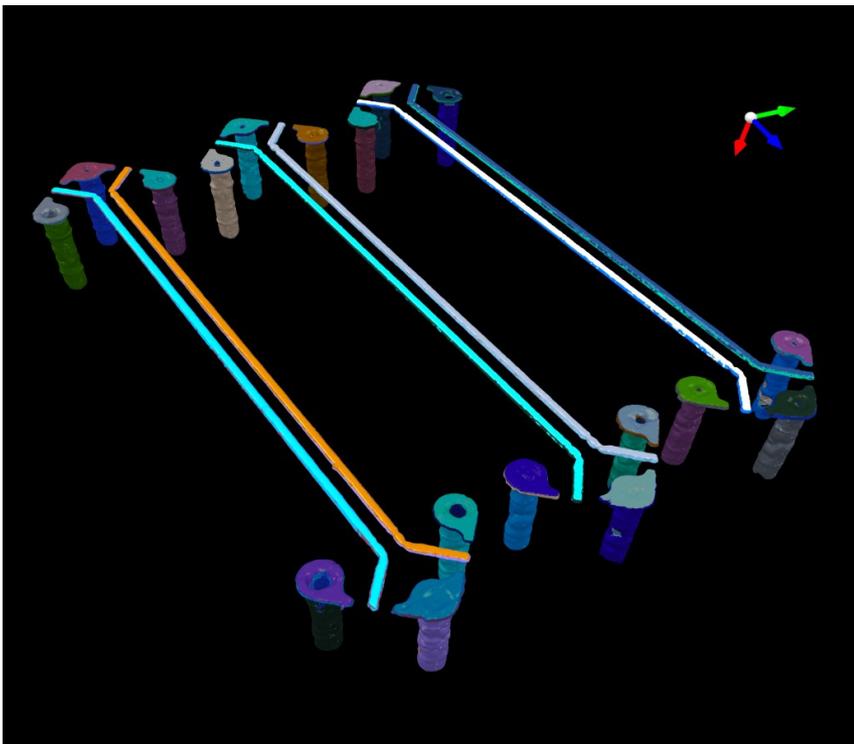
- Geometrievielfalt möglicher Leistungsstrukturen
- (Halb-)automatische Verarbeitung
- Möglichkeit zur Benutzerinteraktion bei schwierigen Datensätzen
- Erweiterbarkeit der Module

Ansatz

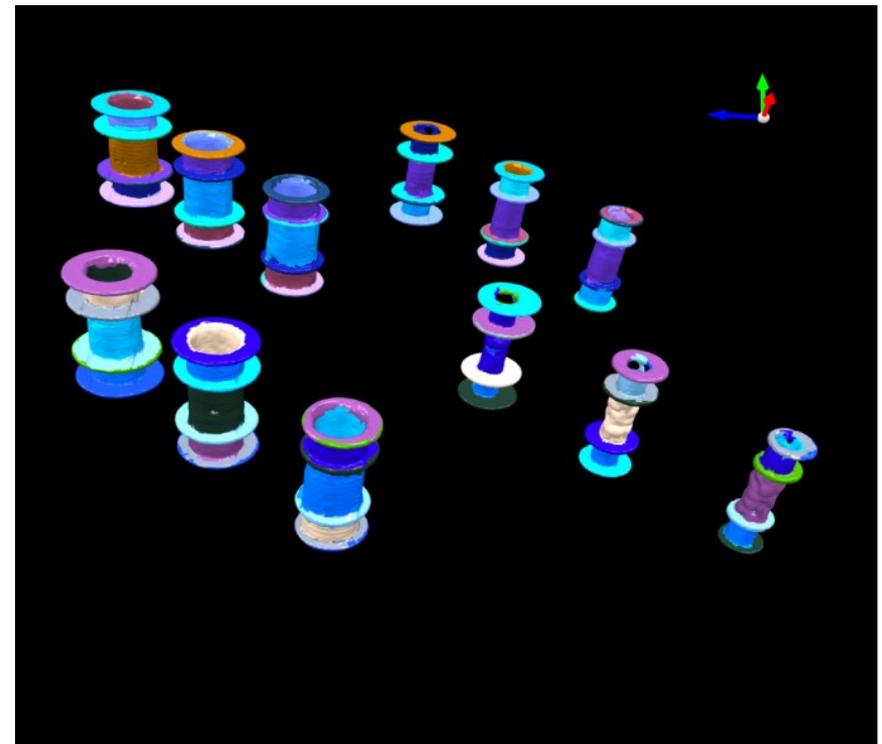
- Segmentierung der STL-Daten
- 3D-Besteinpassung von Regelgeometrien
- Erzeugung von zusammenhängenden Geometrien und CAD-Export

STL-Datenverarbeitung (2)

- Segmentierung gemäß Krümmung, Regelgeometrien-Ähnlichkeit, Zusammenhang, ...



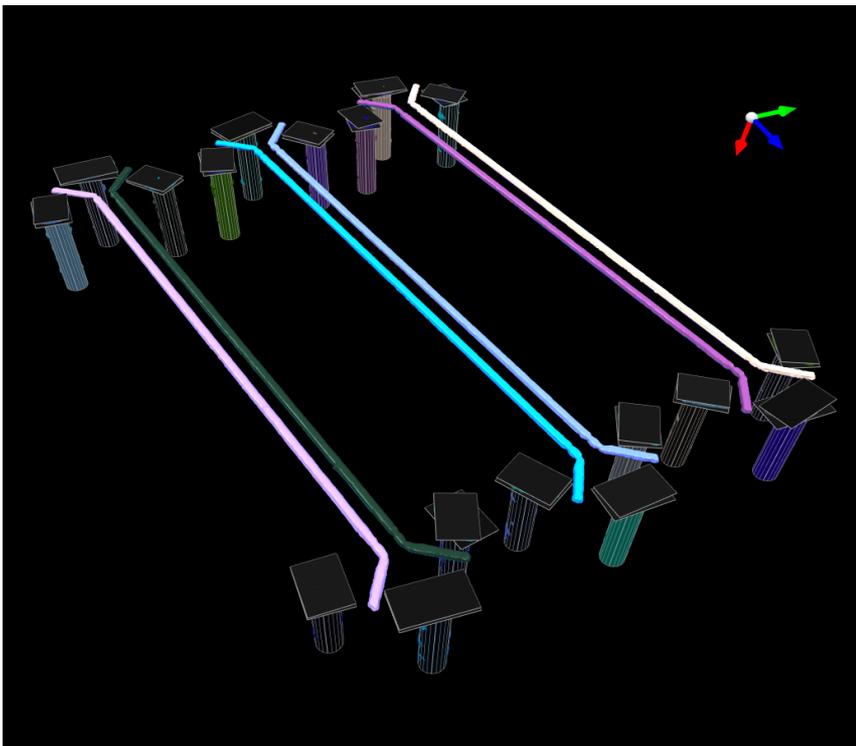
Teststruktur DIFF_MSL_05



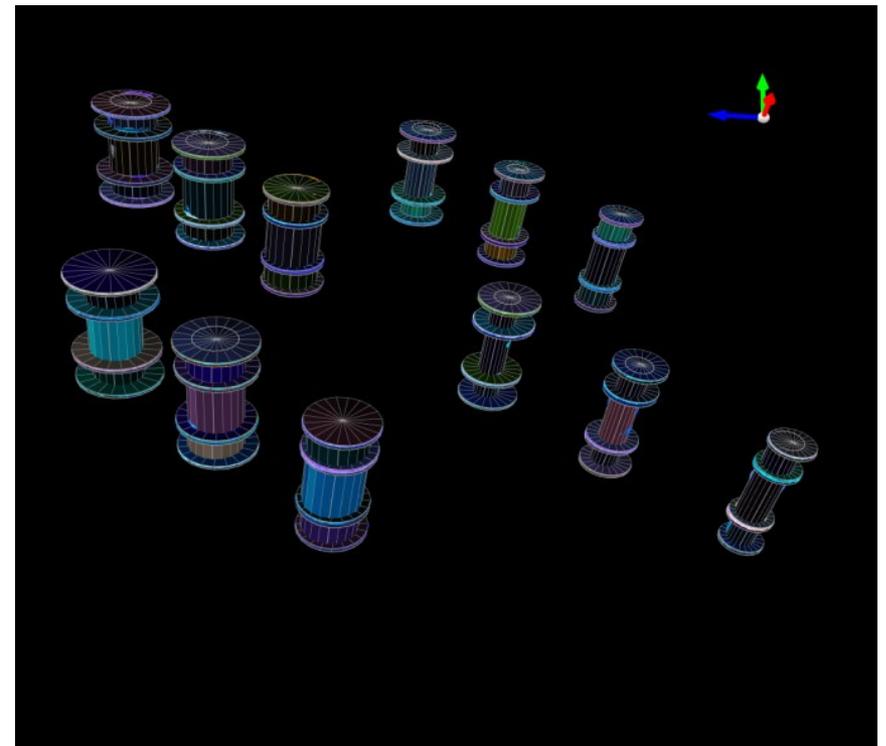
Teststruktur VIA_3

STL-Datenverarbeitung (3)

- Autom. 3D-Besteinpassung von Regelgeometrien und Inlier/Outlier-Segmentierung



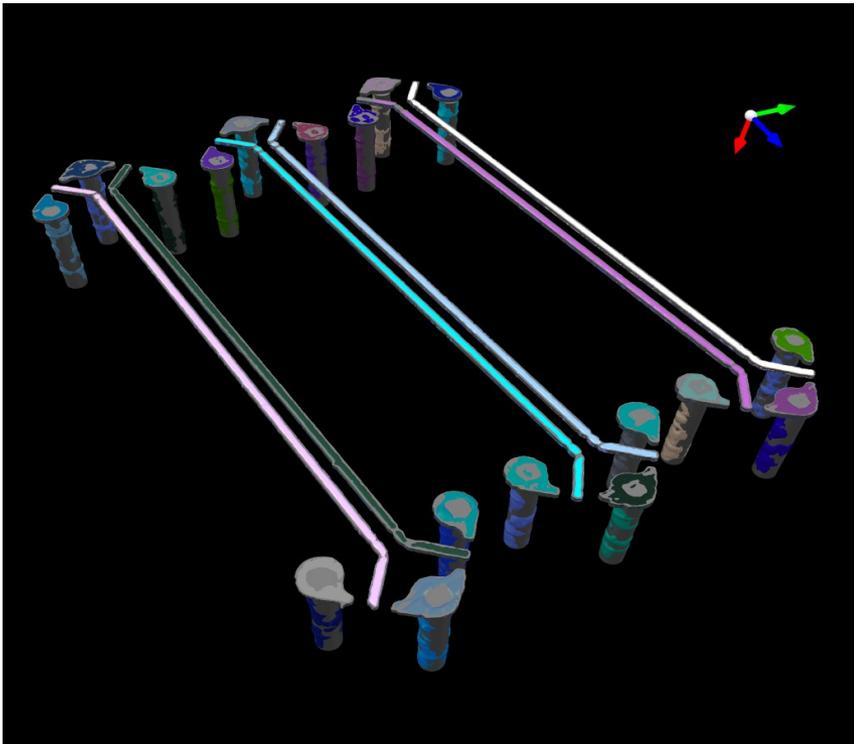
Teststruktur DIFF_MSL_05



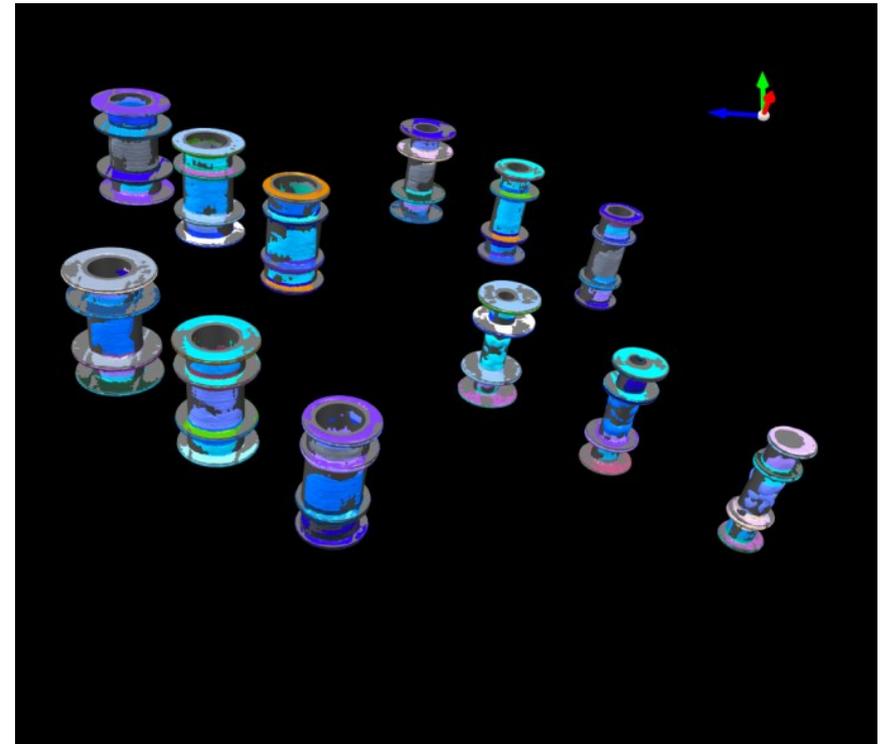
Teststruktur VIA_3

STL-Datenverarbeitung (4)

- Erzeugung zusammenhängender Geometriemodelle



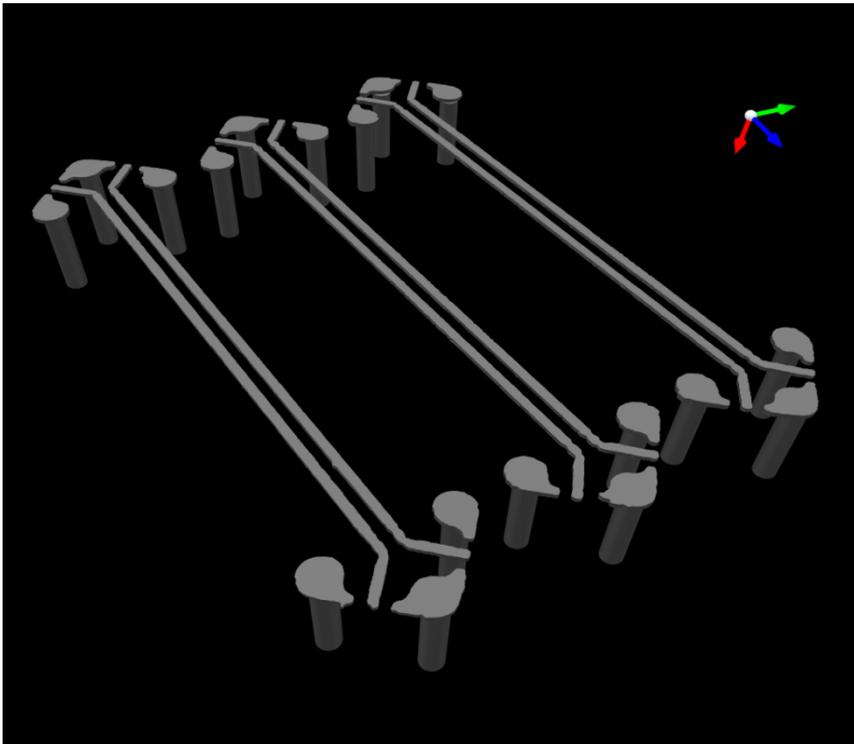
Teststruktur DIFF_MSL_05



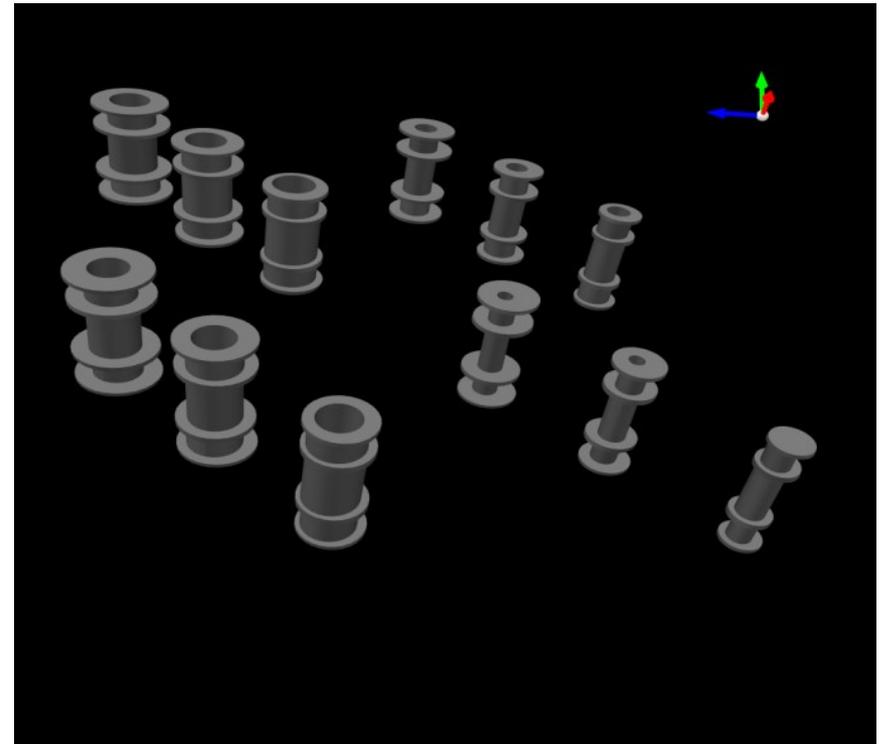
Teststruktur VIA_3

STL-Datenverarbeitung (5)

■ CAD-Export



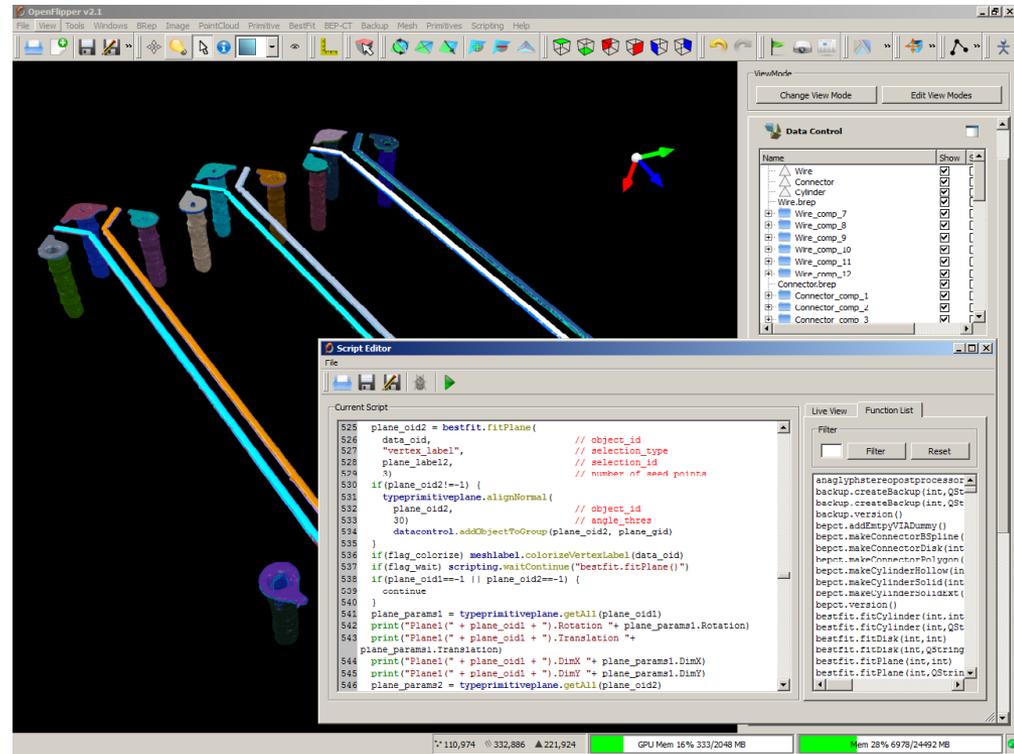
Teststruktur DIFF_MSL_05



Teststruktur VIA_3

STL-Datenverarbeitung & Implementierungsdetails

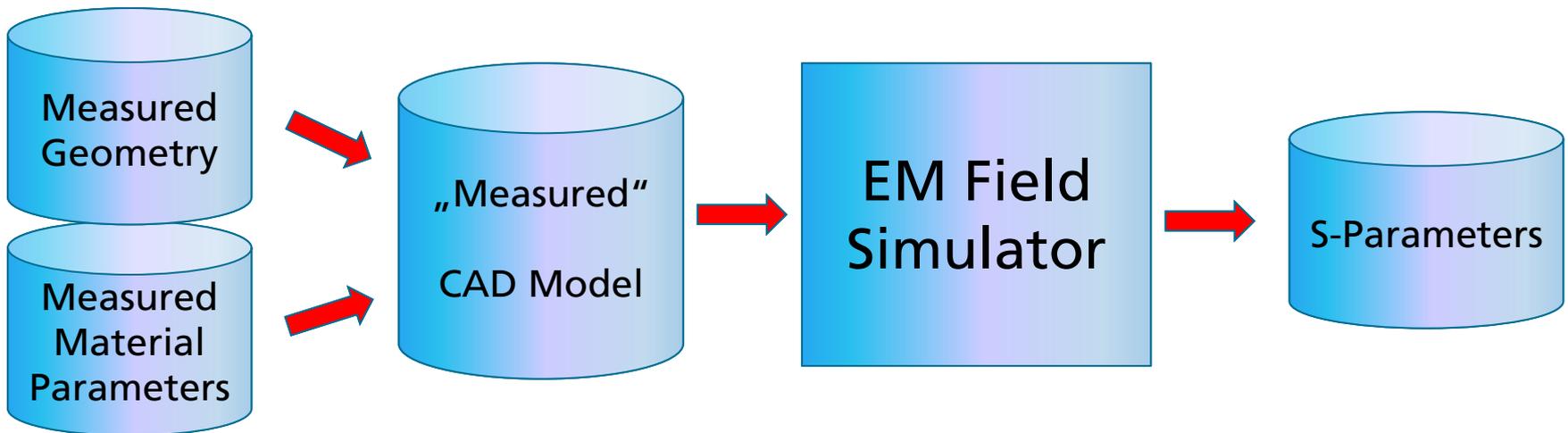
- Realisierung als Programmmodul basierend auf OpenSource Rahmenanwendung OpenFlipper
- Alle Funktionalitäten zur Segmentierung, Besteinpassung, Modellextraktion, Import/Export als Plugins implementiert
- Programmablauf kann über Skripte gesteuert und im Batch-Mode ausgeführt werden
- Benutzerinteraktion über OpenFlipper GUI



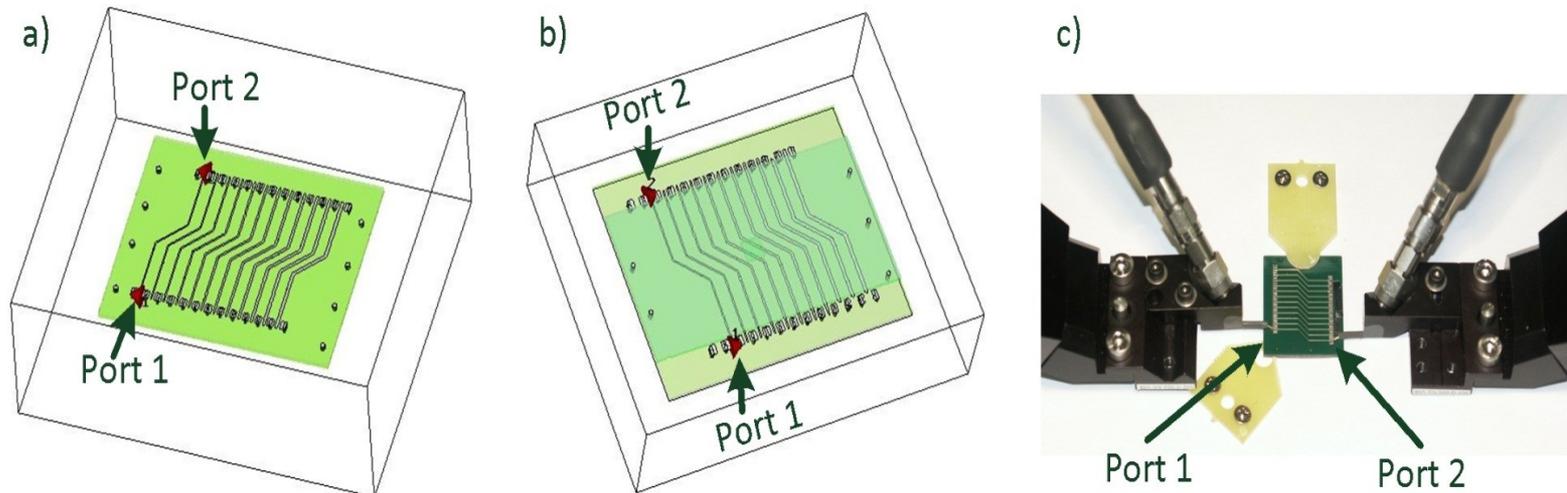
OpenFlipper ScriptEditor
Quelle: <http://www.openflipper.org>

Elektrische Simulation

- Bestimmung der S-Parameter mittels FEM Simulation



Erste Experimentelle Ergebnisse



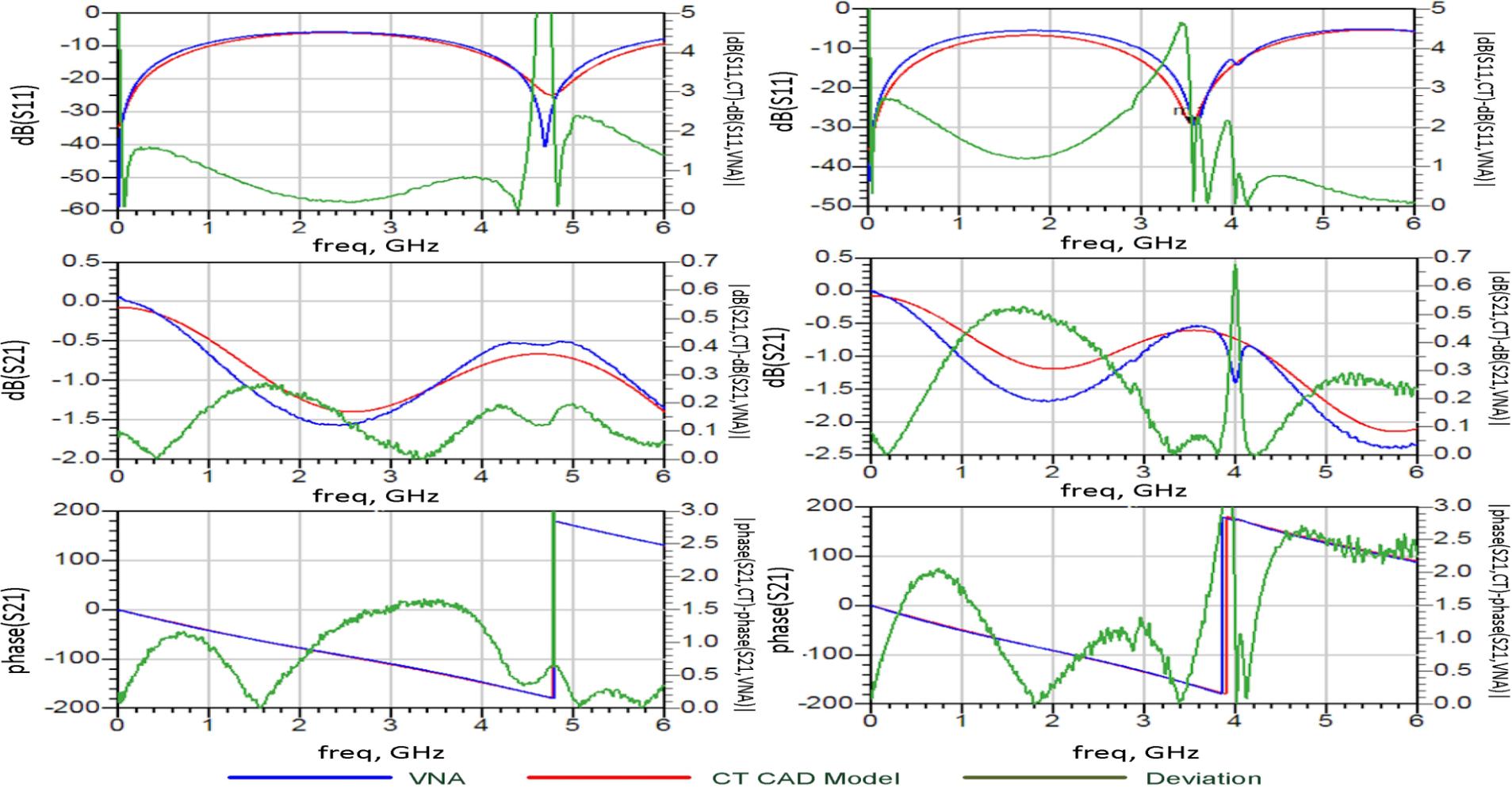
Quelle: J. Hillebrand, Uni Stuttgart, IPVS

- Multilayer-Board mit 2 Layern
 - a) Microstrip Line: $98,53\mu\text{m}$ Leitungsbreite
 - b) Stripline: $62,65\ \mu\text{m}$ Leitungsbreite
- Referenzmessung mit Netzwerkanalysator c)

Erste Experimentelle Ergebnisse

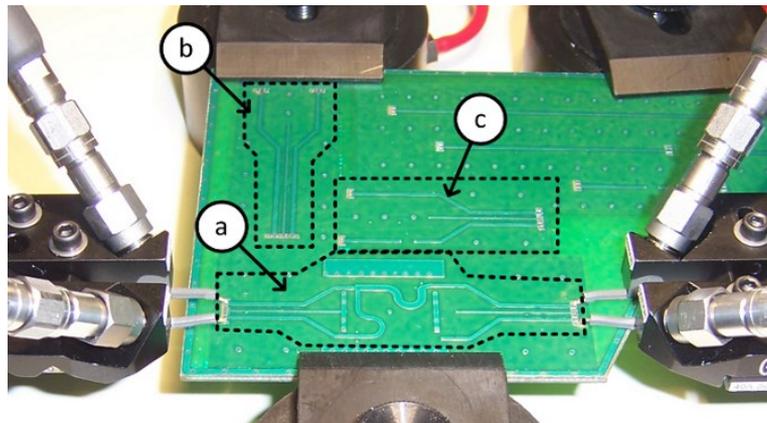
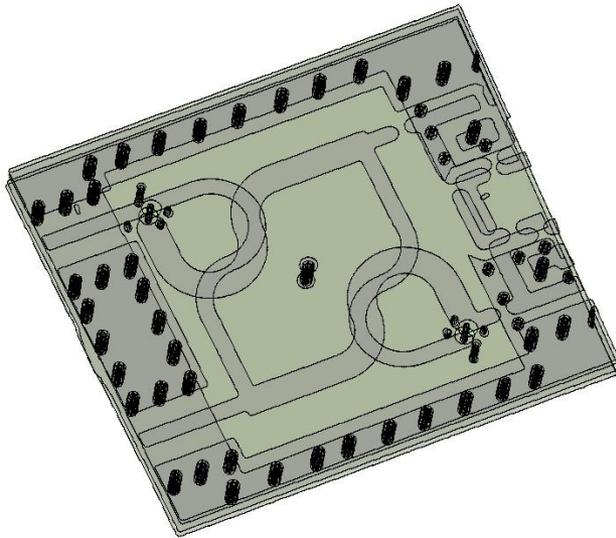
98.54µm Microstrip Line

62.65µm Stripline

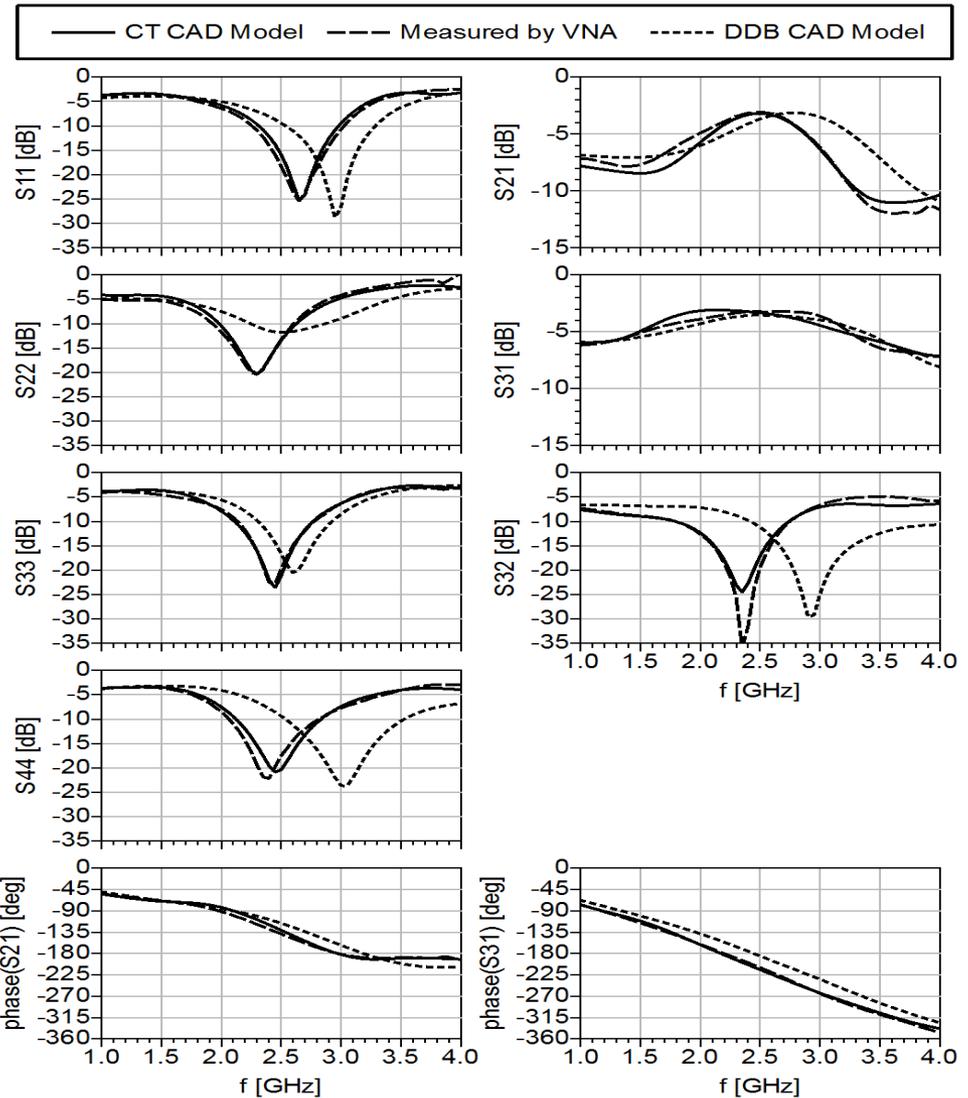


Quelle: J. Hillebrand, Uni Stuttgart, IPVS

Erste Experimentelle Ergebnisse: HF-Hybridkoppler



Quelle: J. Hillebrand, Uni Stuttgart, IPVS



Zusammenfassung

Neues Verfahren zur elektrischen Charakterisierung von Multi-Gigabit-Leitungsstrukturen auf Basis von Computertomographie (CT) Daten

- Gesamte CT-Prozesskette abgebildet: von der Datenaufnahme, über die Datenverarbeitung und 3D-Modellextraktion, bis hin zur elektromagnetischen Feldsimulation
 - Kontaktloses Messprinzip
 - Keine Probleme durch Kontaktierung
 - Beliebige Kontaktstellen möglich z.B. auch bei unzugänglichen Strukturen
 - Nicht-destruktives Testen einzelner Baugruppen komplexer Schaltung
 - Feldsimulation auf Basis der realen Geometrie anstatt des idealen, nominalen CAD-Modells, das zur Fertigung der Leitungsstrukturen verwendet wird
- ➔ Erste Experimentelle Ergebnisse und Referenzmessungen mittels Netzwerkanalysator bestätigen die Leistungsfähigkeit des gewählten Ansatzes

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Kontakt

Ira Effenberger

Fraunhofer IPA
Nobelstr. 12
70569 Stuttgart

Tel.: +49 (0)711 970-1853

Fax: +49 (0)711 970-1004

E-Mail: ira.effenberger@ipa.fraunhofer.de

Jürgen Hillebrand

Universität Stuttgart
Institut für Parallele und Verteilte Systeme
Universitätsstraße 38
70569 Stuttgart

Tel.: +49 (0)711 685-88345

E-Mail: juergen.hillebrand@ipvs.uni-stuttgart.de

