

Kurzbericht zum Teilvorhaben

„Validierung von Systemen flexibler Elektronik mittels nichteuklidischer Geometrien“

innerhalb des Gesamtvorhabens
„Neue Aufbau- und Verbindungstechnik für zuverlässige biegbare Elektronik“
- HyPerStripes -

im Rahmen der EUREKA-Förderinitiative PENTA/Euripides²
gefördert vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt
unter dem Förderkennzeichen: 16ME0473

Technische Universität Dresden Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design - IFTE

Projektleiter: Prof. Dr. Ing. Jens Lienig
E-Mail: jens.lienig@tu-dresden.de
Tel.: +49 351 463 34742

Aufgabenstellung

Flexible und dehnbare Elektronik bietet revolutionäre Möglichkeiten in verschiedenen Anwendungsbereichen. Durch ihre Fähigkeit, sich an unterschiedliche Formen und Oberflächen anzupassen, eignet sie sich besonders für medizinische Implantate, tragbare Technologien und industrielle Sensoren. Die Integration in medizinische Geräte wie Katheter und Neuroimplantate ermöglicht präzisere Diagnosen und Therapien bei gleichzeitig höherem Patientenkomfort. In der Industrie ermöglicht die Rolle-zu-Rolle-Fertigung die effiziente Produktion langer, flexibler Schaltungen, die sich ideal auch für Beleuchtungssysteme eignen. Die Technologie zeichnet sich durch ihre Miniaturisierungsmöglichkeiten und Ressourceneffizienz aus, was sie besonders nachhaltig macht. Zudem ermöglicht die Dehnbarkeit von bis zu 20% auf TPU-Substraten neue Anwendungen in der Wearable-Technologie und smarten Textilien, wo traditionelle starre Elektronik an ihre Grenzen stößt.

Das EU-Projekt „HyPerStripes“ befasst sich mit der Entwicklung neuartiger hochflexibler Verdrahtungsträger, die eine starke Miniaturisierung von Baugruppen sowie eine kostengünstige und ressourcenschonende Verdrahtung ermöglichen. Dabei war es Aufgabe der Technische Universität Dresden, maßgeblich zur Entwicklung von Design-Tools und Simulationsmethoden beizutragen, sowie Simulationen mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) und Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Verfahren durchzuführen.

Hauptziele sind daher: (1) Die Entwicklung fortschrittlicher Simulationsmöglichkeiten für flexible Verdrahtungsträger im gebogenen Zustand, (2) die Integration von Simulationswerkzeugen in den Entwurfsprozess und (3) die Validierung der entwickelten Tools in Zusammenarbeit mit Industriepartnern.

Ablauf des Vorhabens

Die Arbeiten der TU Dresden im Projekt waren durch eine enge Zusammenarbeit mit den Projektpartnern geprägt. Pläne und frühe Ergebnisse wurden regelmäßig bei Projekttreffen geteilt und durch Diskussionen verfeinert. Eine besonders enge Kooperation ergab sich mit der Firma Philips, für die Hochfrequenzsimulationen von gewickelten flexiblen Verdrahtungsträgern als Kabelersatz in räumlich beengten Umgebungen durchgeführt wurden. Dadurch konnten die von der TU Dresden erarbeiteten Simulationsergebnisse durch

Messungen erfolgreich validiert werden. Weitere Kooperationen ergaben sich mit der Firma Reden B.V. auf dem Gebiet der Modellierung und FEM-Simulation.

Ergebnisse

Im Teilvorhaben der TU Dresden entstand die Open-Source-Software „*Fold the Line*“ (*FTL*) zur Unterstützung der dreidimensionalen Modellierung, Vernetzung und Simulation flexibler Verdrahtungsträger. Kernaufgabe war dabei die Transformation von zweidimensionalen Layoutdaten in simulationsfähige 3D-Modelle. Als Eingabeformate werden im Open-Source-Leiterplatteneditor KiCad erstellte Layouts, sowie DXF-, Gerber- und GDSII-Dateien unterstützt. Dadurch ist eine nahtlose Integration in bestehende Entwicklungsumgebungen gewährleistet. Der Gesamte Simulations-Workflow besteht danach aus den Schritten **(1)** Geometriegenerierung zur Überführung zweidimensionaler Layoutdaten in dreidimensionale gebogene bzw. verformte Geometrien (*FTL*), **(2)** Preprocessing der 3D-Modelle zur Sicherstellung konsistenter Schnittstellenflächen und zur logischen Gruppierung der Geometrien (*FTL*), **(3)** Vernetzung (Meshing) zur Erzeugung eines simulierbaren Dreiecksnetz mit adaptivem Detailgrad (gmsh, netgen), **(4)** Modell-Definition zur Festlegung physikalischer und mechanischer Eigenschaften, Randbedingungen und Stimuli, **(5)** FEM- oder FDTD-Simulation (Elmer, Palace, OpenEMS oder andere (auch kommerzielle) Simulatoren) und **(6)** Postprocessing zur Analyse und Visualisierung der Simulationsergebnisse (ParaView).

Die generierten Dreiecksnetze können sowohl in freien Simulatoren, wie z. B. Elmer, Palace oder OpenEMS, als auch in kommerziellen Tools, wie z. B. ANSYS, verwendet werden. Dieser Umstand wurde im Projekt durch thermische Simulationen mit Elmer und Hochfrequenzsimulationen mit Palace und OpenEMS nachgewiesen. Experimente erfolgten anhand des Anwendungsfalls einer Extraktionsvorrichtung für Herzschrittmacherkabel von Philips, wobei die Simulationsergebnisse durch Messungen erfolgreich validiert werden konnten. Thermische Simulationen wurden am Beispiel eines eigens entwickelten IoT-Demonstrators durchgeführt.

Um in KiCad entworfene Platinen für *FTL* verfügbar zu machen, wurde ein KiCad-Plugin entwickelt, das die Generierung und den Export der entsprechenden Daten unterstützt. Dazu wird der Verdrahtungsträger zunächst wie eine starre Platine entworfen. Im letzten Schritt werden dann Biegebereiche durch annotierte Rechtecke und Polygone eingezeichnet. Das Plugin erzeugt aus diesen Informationen eine äquivalente Eingabedatei für *FTL*.

Neben mehreren Vorträgen und einem Posterbeitrag wurden der folgende Zeitschriftenartikel und Konferenzbeitrag veröffentlicht:

N. Arnold, A. Krinke, M. Dietrich and J. Lienig, "An Open-Source Tool for FEM Modeling of Bent Flexible Circuits," in *IEEE Journal on Flexible Electronics*, vol. 4, no. 8, pp. 333-341, Aug. 2025. doi: [10.1109/JFLEX.2025.3594658](https://doi.org/10.1109/JFLEX.2025.3594658).

N. Arnold, A. Krinke, M. Dietrich, J. Lienig, "Please, Fold the Line: Designing Flexible Electronics Using Open-Source Software," in *Proceedings of the 6th IEEE International Flexible Electronics Technology Conference (IFETC 2024)*, Bologna, Italien, S. 15–18, September 2024. doi: [10.1109/IFETC61155.2024.10771875](https://doi.org/10.1109/IFETC61155.2024.10771875)

Auf Basis der im Projekt von der TU Dresden entwickelten Open-Source-Software *FTL* ergibt sich ein kompletter Workflow zur Modellierung und Simulation flexibler Verdrahtungsträger im gebogenen Zustand. Da dieser Workflow wahlweise vollständig mit freier Software umgesetzt werden kann, fallen bei der Nutzung keinerlei Lizenzkosten an. Dies erlaubt insbesondere KMUs und Startups den Entwurf und die Verifikation von flexibler und dehnbarer Elektronik.

Abschlussbericht zum Teilvorhaben

„Validierung von Systemen flexibler Elektronik mittels nicht-euklidischer Geometrien“

des Penta/XECS-Projekts

„Neue Aufbau- und Verbindungstechnik für zuverlässige biegbare Elektronik – HyPerStripes“

Gefördert durch:



Förderkennzeichen: 16ME0473

**Technische Universität Dresden
Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design**

**Projektleiter: Prof. Dr. Ing. Jens Lienig
E-Mail: jens.lienig@tu-dresden.de
Tel.: +49 351 463 34742**

**Autoren: Nico Arnold
Dr. Andreas Krinke
Dr. Manfred Dietrich**

Inhalt

1 Erzielte Ergebnisse.....	3
1.1 Projektübersicht	3
1.2 Simulation mit Open-Source Software.....	4
1.3 Modelling-Tool FTL.....	12
1.4 Anwendungsfälle und Demonstratoren	18
1.5 Ausblick.....	23
2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	24
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten.....	24
4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses und der Erfahrungen	25
5 Bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet der Entwurfsmethodik für flexible Elektronik.....	29
6 Erfolge und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	29

1 Erzielte Ergebnisse

1.1 Projektübersicht

Das EU-geförderte Projekt „HyPerStripes“ befasst sich mit der Entwicklung neuartiger hochflexibler Verdrahtungsträger, die eine starke Miniaturisierung von Baugruppen sowie eine kostengünstige und ressourcenschonende Verdrahtung ermöglichen. Dabei hat die Technische Universität Dresden als akademischer Partner maßgeblich zur Entwicklung von Design-Tools und Simulationsmethoden beigetragen.

1.1.1 Hintergrund

Flexible und dehnbare Elektronik bietet revolutionäre Möglichkeiten in verschiedenen Anwendungsbereichen. Durch ihre Fähigkeit, sich an unterschiedliche Formen und Oberflächen anzupassen, eignet sie sich besonders für medizinische Implantate, tragbare Technologien und industrielle Sensoren. Die Integration in medizinische Geräte wie Katheter und Neuroimplantate ermöglicht präzisere Diagnosen und Therapien bei gleichzeitig höherem Patientenkomfort. In der Industrie ermöglicht die Rolle-zu-Rolle-Fertigung die effiziente Produktion langer, flexibler Schaltungen, die sich ideal auch für Beleuchtungssysteme eignen. Die Technologie zeichnet sich durch ihre Miniaturisierungsmöglichkeiten und Ressourceneffizienz aus, was sie besonders nachhaltig macht. Zudem ermöglicht die Dehnbarkeit von bis zu 20% auf TPU-Substraten neue Anwendungen in der Wearable-Technologie und smarten Textilien, wo traditionelle starre Elektronik an ihre Grenzen stößt.

1.1.2 Hauptziele

Das Projekt wurde von einem internationalen Konsortium durchgeführt, wobei das IFTE folgende Hauptverantwortlichkeiten trug:

- Entwicklung von Design-Tools und Simulationsmethoden und
- Durchführung von RF-Simulationen und FEM-Modellierung.

Im Rahmen des Projekts wurden dabei folgende Hauptziele verfolgt:

- Entwicklung fortschrittlicher Simulationsmöglichkeiten,
- Integration von Simulationswerkzeugen in den Designprozess und
- Validierung der entwickelten Tools durch Industriepartner.

Dabei lag die Tätigkeit des IFTE in den folgenden Arbeitspaketen:

- WP1: Design und Simulation und
- WP6: Technologieplattform und nachhaltige Produktion

1.1.3 Erfolge

Die Hauptidee des Projekts umfassen:

- Entwicklung des "Fold the Line" (FTL) Tools zur 3D-Modellierung,

- Integration fortschrittlicher Simulationsmethoden,
- Implementierung des VMAP-Standards als Python-Library,
- Simulation von im Projekt verwendeten Strukturen,
- Erfolgreiche Validierung durch Industriepartner und
- Publizieren der Erfolge.

1.2 Simulation mit Open-Source Software

Die Simulation flexibler elektronischer Systeme wird durch verschiedene spezialisierte Open-Source-Tools ermöglicht, die sich in ihren Fähigkeiten und Anwendungsbereichen ergänzen. Dabei kommen sowohl Finite-Elemente-Methoden (FEM) als auch Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Verfahren zum Einsatz. Im Rahmen des Projektes wurden dabei verschiedene Methoden und Programme auf Ihre Eignung untersucht und ein entsprechender Workflow generiert.

1.2.1 Allgemeiner Simulations-Workflow

Die Arbeitsweise von der 2D-Geometrie bis zur Simulation in der Entwicklung flexibler Elektroniksysteme folgt einem klar strukturierten Workflow, der mehrere aufeinander aufbauende Schritte umfasst (siehe Abbildung 1). Am Anfang steht die **Geometriegenerierung**: Hier werden zweidimensionale Layoutdaten, beispielsweise aus KiCad-, Gerber- oder DXF-Dateien, extrahiert und in dreidimensionale Modelle, die auch einer nichteuklidischen Geometrie unterliegen können, überführt.

Im anschließenden **Preprocessing** werden die 3D-Modelle für die Simulation vorbereitet. Boolean-Operationen sorgen dafür, dass Schnittstellen zwischen Komponenten konsistent sind und spätere Vernetzungsprobleme vermieden werden. Außerdem werden die Geometrien nach einzelnen Teilen oder Lagen gruppiert, um später im Mesh eine Unterscheidung der Bereiche zu ermöglichen.

Die **Vernetzung (Meshing)** erfolgt meist automatisiert mit Tools wie *gmsh* oder *netgen*. Hierbei wird das Modell in kleine, finite Elemente unterteilt. Kleinere Elemente ergeben ein feineres Netz, das realitätsnähere Ergebnisse ermöglicht, allerdings auch länger zum Lösen benötigt.

In der Phase der **Modell-Definition** werden die physikalischen und mechanischen Eigenschaften, Randbedingungen und Lasten festgelegt. Dies umfasst die Zuweisung von Materialparametern, die Definition von bspw. Wärmequellen oder Spannungen und Strömen. Dazu werden die vorher bereits erwähnten Geometrie-Gruppen benötigt. Das **Lösen des Modells** erfolgt in der Simulationssoftware, die auf Basis der definierten Parameter und des Netzes die gewünschten physikalischen Größen berechnen, etwa Temperaturverteilungen, Stromdichten oder elektromagnetische Felder.

Im abschließenden **Postprocessing** werden die Simulationsergebnisse analysiert und visualisiert. Tools wie *ParaView* ermöglichen die anschauliche Darstellung von Temperaturfeldern, elektrischen Strömen oder Feldverteilungen, sodass die Auswirkungen von Designentscheidungen direkt bewertet werden können. Die

Integration aller Schritte in einen durchgängigen Workflow erleichtert die Entwicklung und Optimierung flexibler Elektronik erheblich.

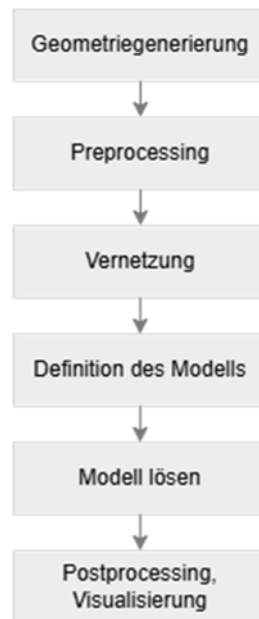


Abbildung 1: Genereller Simulations-Workflow

1.2.2 Erster Ansatz eines Workflows

Im ersten Workflow spielte die Kombination aus *FreeCAD* und *SALOME* eine zentrale Rolle bei der Überführung von zweidimensionalen Layoutdaten in simulationsfähige 3D-Modelle. Ausgangspunkt war in der Regel ein flaches Leiterplattenlayout, das beispielsweise mit *KiCad* erstellt wurde (siehe Abbildung 2). Um diese flachen Geometrien in räumliche Modelle zu überführen, wurde zunächst *FreeCAD* eingesetzt: Mithilfe des *fcad_pcb*-Makros wurden die 2D-Polygone, die etwa das Substrat, Leiterbahnen und Pads repräsentieren, in ein 3D-Modell aus einzelnen Schichten extrudiert. Allerdings war die Handhabung komplexer Geometrien, wie sie bei flexiblen Schaltungen mit mehreren Biegebereichen oder Spiralformen auftreten, mit *FreeCAD* nur eingeschränkt und oft mit zusätzlichem manuellem Aufwand möglich.

Nach der Geometrieerzeugung erfolgte der Export der 3D-Modelle in ein geeignetes Format, typischerweise STEP oder STL. Diese Modelle wurden anschließend in *SALOME Meca* importiert, das als leistungsfähige Open-Source-Plattform für Preprocessing und Meshing diente. *SALOME* ermöglichte die Erzeugung hochwertiger Meshes, die für die numerische Simulation unerlässlich sind. Besonders wichtig war dabei die Möglichkeit, die Netzfeinheit zu steuern und Geometrie-Gruppen zu definieren, um später Materialeigenschaften, Randbedingungen oder Lasten zuzuweisen. Allerdings traten bei der Verarbeitung gebogener Geometrien in *SALOME* häufig Probleme auf: Selbstüberschneidungen, Geometriefehler und die Notwendigkeit sehr feiner Netze für die gesamte Geometrie erschwerten die Vorbereitung simulationsfähiger Modelle erheblich. Diese Herausforderungen führten zu einem hohen manuellen Aufwand und verlängerten die Bearbeitungszeiten deutlich.

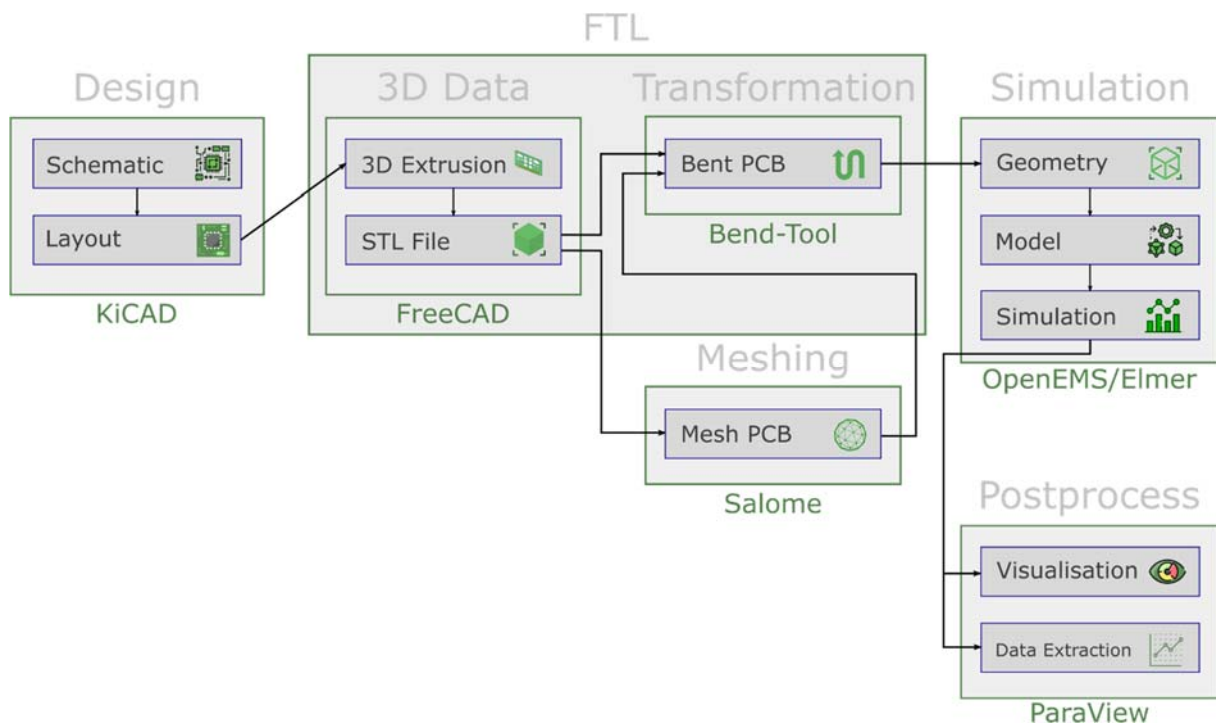


Abbildung 2: Erster Ansatz zum Simulationsworkflow

Ein weiterer Nachteil des Workflows war die fehlende Integration zwischen den einzelnen Tools. Der Wechsel zwischen FreeCAD, SALOME und weiteren Simulationsprogrammen wie *Elmer* oder *OpenEMS* erforderte wiederholte Datenkonvertierungen und erhöhte die Fehleranfälligkeit. Zudem war es in FreeCAD nicht möglich, geometrische Gruppen direkt auf dem Mesh zu definieren, was die spätere Zuweisung von Materialeigenschaften erschwerte. Die Abhängigkeit von mehreren externen Programmen führte zu einem fragmentierten und wenig effizienten Prozess, der insbesondere bei komplexen oder großformatigen flexiblen Schaltungen an seine Grenzen stieß.

Insgesamt war dieser frühe Workflow zwar grundsätzlich geeignet, um flexible Elektronik von der 2D-Layoutphase bis zur Simulation zu begleiten, jedoch mit erheblichen Nachteilen hinsichtlich Effizienz, Flexibilität und Fehleranfälligkeit behaftet. Diese Schwächen waren ein wesentlicher Antrieb für die Entwicklung integrierter Lösungen, die Geometrieerzeugung, Meshing, Biegung und Gruppendifinition in einem durchgängigen Workflow vereinen und so die Vorbereitung von Simulationen deutlich vereinfachen.

1.2.3 Verwendete Tools

1.2.3.1 Gmsh

Gmsh spielt dabei als Mesher und als Geometrie-Engine eine zentrale Rolle im Simulations-Workflow für flexible und dehnbare Elektroniksysteme. Als Open-Source-Meshing-Tool ist gmsh darauf spezialisiert, komplexe 3D-Geometrien zu erstellen, verarbeiten und daraus hochwertige Meshes zu generieren, die als Grundlage für numerische Simulationen dienen.

Ein wesentliches Merkmal von gmsh ist die Möglichkeit, die Netzfeinheit in bestimmten Bereichen gezielt zu steuern. So können beispielsweise kritische Zonen mit hoher Detailgenauigkeit versehen werden, während weniger relevante Bereiche gröber vernetzt werden, um Rechenressourcen zu sparen. Darüber hinaus unterstützt gmsh die Generierung von Gruppen. Diese Gruppen fassen Flächen oder Volumina zusammen, die im späteren Simulationsschritt mit spezifischen Materialeigenschaften, Randbedingungen oder Kräften versehen werden müssen. Dies ist besonders wichtig für die realitätsnahe Abbildung von Bauteilübergängen, Löt pads oder unterschiedlichen Substratmaterialien.

Ein weiterer Vorteil ist die nahtlose Integrierbarkeit von gmsh aufgrund seiner umfassenden API. Die Geometrieerzeugung, das Preprocessing (z.B. das Vereinheitlichen von Knoten an Schnittstellen durch Boolean-Operationen) und die Netzerstellung können automatisiert erfolgen, ohne den anfangs notwendigen Umweg über externe Programme wie FreeCAD oder Salome. Dadurch wird der gesamte Prozess von der Geometrie bis zur simulationsbereiten Datei erheblich beschleunigt und vereinfacht.

Die von gmsh erzeugten Netze können in verschiedenen Formaten exportiert werden, etwa als Datei „.msh“ für elektromagnetische Simulationen mit *Palace* oder als Datei „.unv“ für multiphysikalische Analysen mit Elmer. Damit ist eine breite Kompatibilität mit gängigen Simulationswerkzeugen gewährleistet.

Insgesamt ermöglicht gmsh eine effiziente, flexible und automatisierte Vorbereitung von Simulationsmodellen. Es bildet die Brücke zwischen der geometrischen Modellierung und der physikalischen Analyse und ist damit ein unverzichtbares Werkzeug für die Entwicklung und Optimierung moderner flexibler Elektroniksysteme.

1.2.3.2 Salome Meca

SALOME ist eine Open-Source-Plattform für numerische Simulationen und wird insbesondere als Pre- und Postprozessor eingesetzt. Die Software wurde ursprünglich von der französischen Atomenergiebehörde (CEA) und Electricité de France (EDF) entwickelt und ist heute ein etabliertes Werkzeug für die Vorbereitung, Vernetzung und Analyse von 3D-Geometrien in der Finite-Elemente-Methode (FEM). Besonders hervorzuheben sind die fortschrittlichen Meshing-Funktionen: SALOME integriert eine Vielzahl verschiedener Vernetzungsalgorithmen, unterstützt sowohl strukturierte als auch unstrukturierte Netze und erlaubt eine gezielte Steuerung der Netzfeinheit, was für die Simulation komplexer Geometrien – wie sie etwa in der flexiblen Elektronik auftreten – von Vorteil ist.

SALOME Meca wird genutzt, um aus 3D-Modellen Netze zu generieren und diese für weiterführende FEM-Simulationen vorzubereiten. Die Plattform unterstützt dabei den Export in gängige Formate wie UNV oder STL und ermöglicht die Definition geometrischer Gruppen, die für die spätere Zuweisung von Materialeigenschaften und Randbedingungen benötigt werden.

Allerdings sind im praktischen Einsatz auch Herausforderungen zu bewältigen: Insbesondere bei der Vernetzung gebogener Geometrien treten häufig Geometriefehler auf, die manuelles Eingreifen und damit hohen Aufwand erfordern. Diese Limitierungen haben dazu geführt, dass im HyPerStripes-Projekt an einer

stärkeren Integration von Meshing-Funktionen in FTL gearbeitet wurde, um die Abhängigkeit von externen Tools wie SALOME zu reduzieren und den Workflow effizienter zu gestalten. Insgesamt bleibt SALOME jedoch ein nützliches Werkzeug für die Vorbereitung und Analyse simulationsfähiger Modelle.

1.2.3.3 Elmer

Elmer ist eine leistungsstarke Open-Source-Software für multiphysikalische Simulationen. Entwickelt vom CSC – IT Center for Science in Finnland, basiert Elmer auf der Finite-Elemente-Methode (FEM) und ermöglicht die numerische Lösung komplexer physikalischer Probleme, darunter Wärmeleitung, Elektromagnetik, Strömungsmechanik, Strukturmechanik und gekoppelter Phänomene. Die modulare Architektur von Elmer erlaubt es, verschiedene physikalische Solver flexibel zu kombinieren und so maßgeschneiderte Simulationen zu erstellen.

Elmer ist im Projekt ein zentrales Werkzeug für die Simulation flexibler und dehnbarer Elektronik. Hierbei werden beispielsweise elektrische und thermische Simulationen durchgeführt, um Stromdichten, Spannungsabfälle und Temperaturverteilungen in gebogenen Schaltungen zu berechnen. Elmer unterstützt dabei die Analyse von realitätsnahen, verformten Geometrien, die zuvor aus 2D-Geometrien generiert und vernetzt wurden. Durch die Unterstützung offener Schnittstellen und Formate (z.B. UNV) ist Elmer zudem leicht in bestehende Toolchains integrierbar.

1.2.3.4 OpenEMS

OpenEMS ist eine Open-Source-Software zur Simulation elektromagnetischer Felder, die auf der Finite-Difference Time-Domain (FDTD)-Methode basiert. Ihr Hauptzweck liegt in der numerischen Lösung der Maxwell-Gleichungen, wodurch sich OpenEMS besonders für Hochfrequenzanwendungen wie Antennendesign, Wellenleiteranalysen und elektromagnetische Verträglichkeitsuntersuchungen (EMV) eignet. Sie integriert einen eigenen CAD-Viewer (siehe Abbildung 3) und berechnet wichtige elektrische Kenngrößen wie S-Parameter sowie Impedanzen (siehe Abbildung 4) und ermöglicht Time Domain Reflectometry (TDR)-Analysen zur Fehlerlokalisierung in Leitungen.

OpenEMS ermöglicht die detaillierte Analyse von Wellenausbreitung, Reflexionen und Kopplungseffekten, wobei die Simulation aktuell auf planare oder flache Strukturen beschränkt und das Meshing relativ aufwändig ist. Dies macht OpenEMS ideal für die Untersuchung von klassischen Leiterplatten, Transmission Lines und anderen ebenen Strukturen, während für gebogene oder verformte Geometrien alternative Methoden wie die Finite-Elemente-Methode (FEM) besser geeignet sind.

Durch seinen Status als Open-Source-Software lässt sich OpenEMS flexibel in bestehende Workflows integrieren. Die Ergebnisse lassen sich in gängigen Formaten exportieren, was eine nahtlose Weiterverarbeitung und Analyse ermöglicht. Damit erweist sich OpenEMS als nützlich zur Optimierung von Signalübertragung, Minimierung von Verlusten und Sicherstellung der EMV.

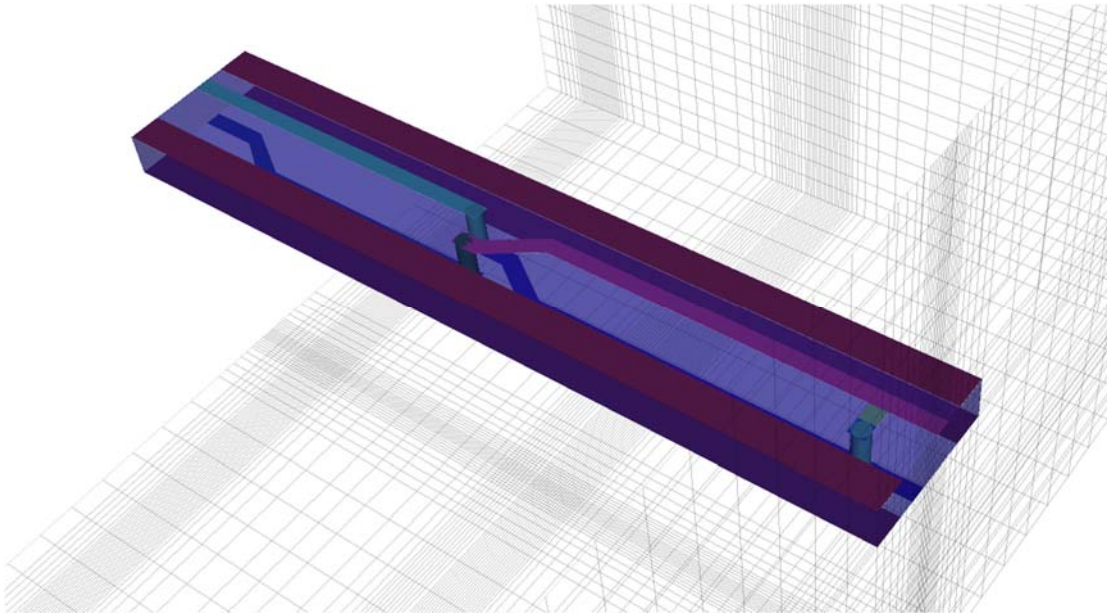


Abbildung 3: Modell eines CPW in OpenEMS

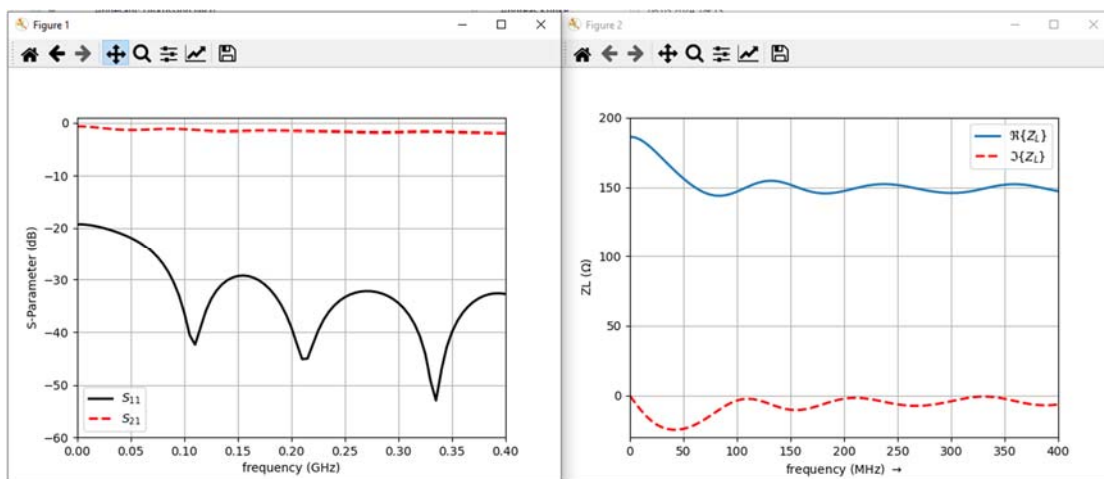


Abbildung 4: Simulation von S-Parametern und charakteristischer Impedanz des CPW

1.2.3.5 Palace

Palace ist eine Open-Source-Software für die numerische Simulation elektromagnetischer Felder mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM). Damit ist Palace speziell darauf ausgelegt, komplexe dreidimensionale, elektromagnetische Probleme zu lösen. Palace ermöglicht die Analyse von Hochfrequenzverhalten, Wellenausbreitung, charakteristischer Impedanz, Kopplungseffekten und elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV) in elektrischen Systemen.

Ein besonderer Vorteil von Palace ist die Fähigkeit, auch komplexe, nicht-planare Geometrien effizient zu simulieren – ein entscheidender Aspekt für flexible Elektronik, bei der klassische FDTD-Tools wie OpenEMS an ihre Grenzen stoßen. Palace ist zudem offen und erweiterbar, was die Integration in bestehende Simulations-

Toolchains erleichtert. Die Ergebnisse können in gängigen Formaten exportiert und mit Visualisierungstools wie ParaView ausgewertet werden.

1.2.3.6 ParaView

ParaView ist eine leistungsstarke Open-Source-Software für die wissenschaftliche Datenanalyse und Visualisierung, die speziell für die Darstellung und Auswertung großer und komplexer Datensätze entwickelt wurde. Die Software unterstützt eine Vielzahl von Datenformaten, darunter strukturierte und unstrukturierte Meshes, und ist in der Lage, sowohl skalare als auch Vektorfelder zu visualisieren. Zu den wichtigsten Möglichkeiten von ParaView zählt die interaktive 3D-Visualisierung, bei der User Simulationsergebnisse wie Temperaturverteilungen, elektrische und magnetische Feldvektoren oder mechanische Spannungen anschaulich dargestellt werden können. ParaView bietet fortschrittliche Visualisierungstechniken wie Volumen- und Oberflächenrendering, Streamlines, Konturplots und Animationen für zeitabhängige Daten.

Ein besonderer Vorteil ist die Skalierbarkeit: ParaView kann sowohl auf Desktop-Rechnern als auch auf Hochleistungsrechnern betrieben werden und eignet sich daher für sehr große Datensätze, wie sie beispielsweise in der Finite-Elemente- oder FDTD-Simulation entstehen. Die Software lässt sich durch Python-Skripte und Plugins flexibel erweitern und automatisieren, was insbesondere für wiederkehrende Analyseaufgaben und die Integration in bestehende Workflows von Vorteil ist.

Im Kontext von FEM-Simulationen wird ParaView genutzt, um Simulationsergebnisse aus Tools wie Elmer oder OpenEMS zu visualisieren. So können beispielsweise elektrische Feldverteilungen um Leiterbahnen, Temperaturfelder oder mechanische Belastungen nach Biegung und Verformung in flexiblen Schaltungen detailliert analysiert werden. Die Möglichkeit, Messdaten gezielt darzustellen und zu verarbeiten, unterstützt die gezielte Optimierung und Validierung von Designs. ParaView ist damit ein unverzichtbares Werkzeug für die Analyse und Präsentation der Ergebnisse von FEM-Simulationen.

1.2.3 Workflowansätze

Die Kombination dieser Tools ermöglicht eine umfassende Analyse flexibler elektronischer Systeme: Während Elmer und Palace für die Simulation komplexer 3D-Geometrien und Multiphysik-Probleme eingesetzt werden, kommt OpenEMS für spezialisierte Hochfrequenzanalysen in planaren Bereichen, am besten sogar nur in Teilstücken der kompletten Platine, zum Einsatz. Diese ergänzende Nutzung der verschiedenen Simulationswerkzeuge erlaubt eine gründliche Untersuchung aller relevanten Aspekte, von thermischen Effekten über mechanische Belastungen bis hin zu elektromagnetischen Eigenschaften.

Aus den so generierten Übertragungsparametern kann nun eine elektrische SPICE-Simulation aufgebaut werden, in der anhand von beliebigen Signalen das Übertragungsverhalten der Schaltung untersucht werden kann. Damit können sowohl die Ausgangssignale unter Berücksichtigung von Verlusten etc. als auch ein entsprechendes Augendiagramm zur Charakterisierung der Übertragungsgüte generiert werden (siehe Abbildung 5).

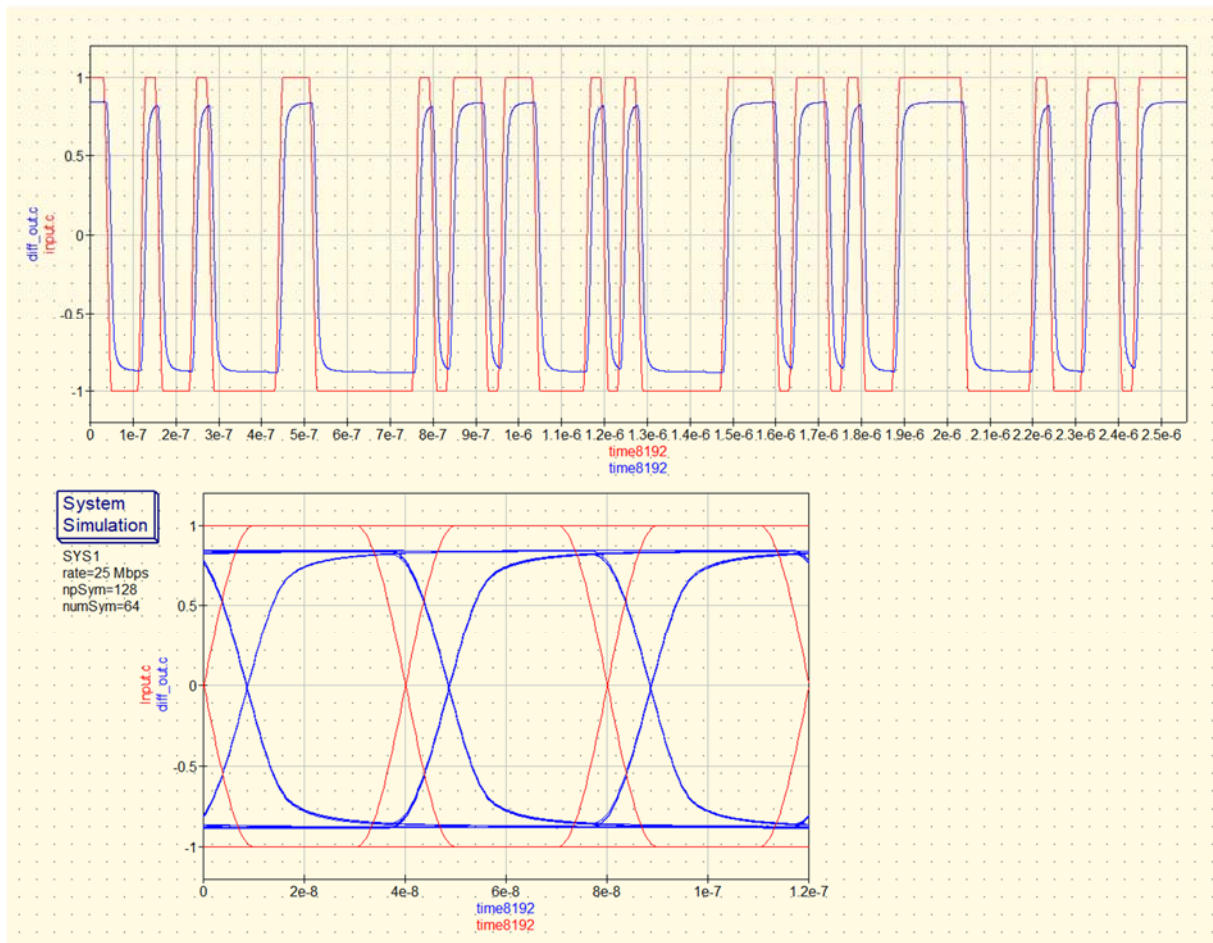


Abbildung 5: SPICE-Simulation der Übertragungseigenschaften

1.3 Modelling-Tool FTL

Die Entwicklung flexibler elektronischer Systeme erfordert spezialisierte Werkzeuge für die präzise Vorhersage ihres Verhaltens in der Anwendung. Unser Open-Source-Tool "Fold the Line" (FTL) wurde speziell für diese Herausforderung entwickelt und bietet einen innovativen Ansatz zur Transformation von zweidimensionalen Layoutdaten in simulationsfähige 3D-Modelle.

Ein Kernmerkmal von FTL ist die umfassende Unterstützung verschiedener Eingangsformate. Das Tool verarbeitet nicht nur KiCad-Layouts, sondern auch DXF und GDSII-Formate, wodurch eine nahtlose Integration in bestehende Entwicklungsumgebungen gewährleistet wird. Besonders hervorzuheben ist die direkte Integration mit der Open-Source-EDA-Suite KiCad, die den Workflow für Entwickler erheblich vereinfacht.

Die 3D-Transformationsfähigkeiten von FTL ermöglichen eine parametrische Biegung und Verformung von Leiterplatten, wobei Biegebereiche und -winkel präzise definiert werden können. Diese Funktionalität ist entscheidend für die Entwicklung flexibler Elektronik, die sich an komplexe geometrische Anforderungen anpassen muss.

Die neueste Version von FTL zeichnet sich durch eine integrierte Mesh-Generierung aus, die die bisherige Abhängigkeit von externen Programmen eliminiert. Diese Integration vereinfacht den Entwicklungsprozess erheblich und ermöglicht einen durchgängigen Workflow von der Geometrieerzeugung bis zur Simulationsvorbereitung.

Die Möglichkeit, die gebogene Platine bereits vor der Simulation oder Fertigung betrachten bzw. als Modell für ein CAD-Programm exportieren zu können, ermöglicht eine präzise Anpassung zwischen Elektronik und Mechanik.

1.3.1 KiCad-Plugin

Um die in KiCad entworfenen Platinen für FTL verfügbar zu machen, wurde ein Plugin entwickelt, das die Generierung und den Export der entsprechenden Daten unterstützt. Dazu wird die Platine wie eine starre Platine entworfen, und im finalen Schritt werden dann Rechtecke und Polygone für die entsprechenden Biegebereiche eingezeichnet, wie in Abbildung 6 gezeigt. Durch einen Klick auf das Symbol des Plugins kann ein Dialogfenster geöffnet werden, das die Konfiguration der aktuell markierten Transformation ermöglicht. Hier können sämtliche Parameter eingestellt werden.

Die so entstandenen Daten werden lokal in einer Datei innerhalb des geöffneten Projektes abgelegt. Durch eine Verknüpfung der Transformation mit der jeweiligen Geometrie-ID des Rechtecks kann eine eindeutige Zuordenbarkeit sichergestellt werden, sodass einmal eingestellte Werte später wieder geändert werden können.

Die entstandene Datei kann später als Eingabedatei für *FTL* genutzt werden.

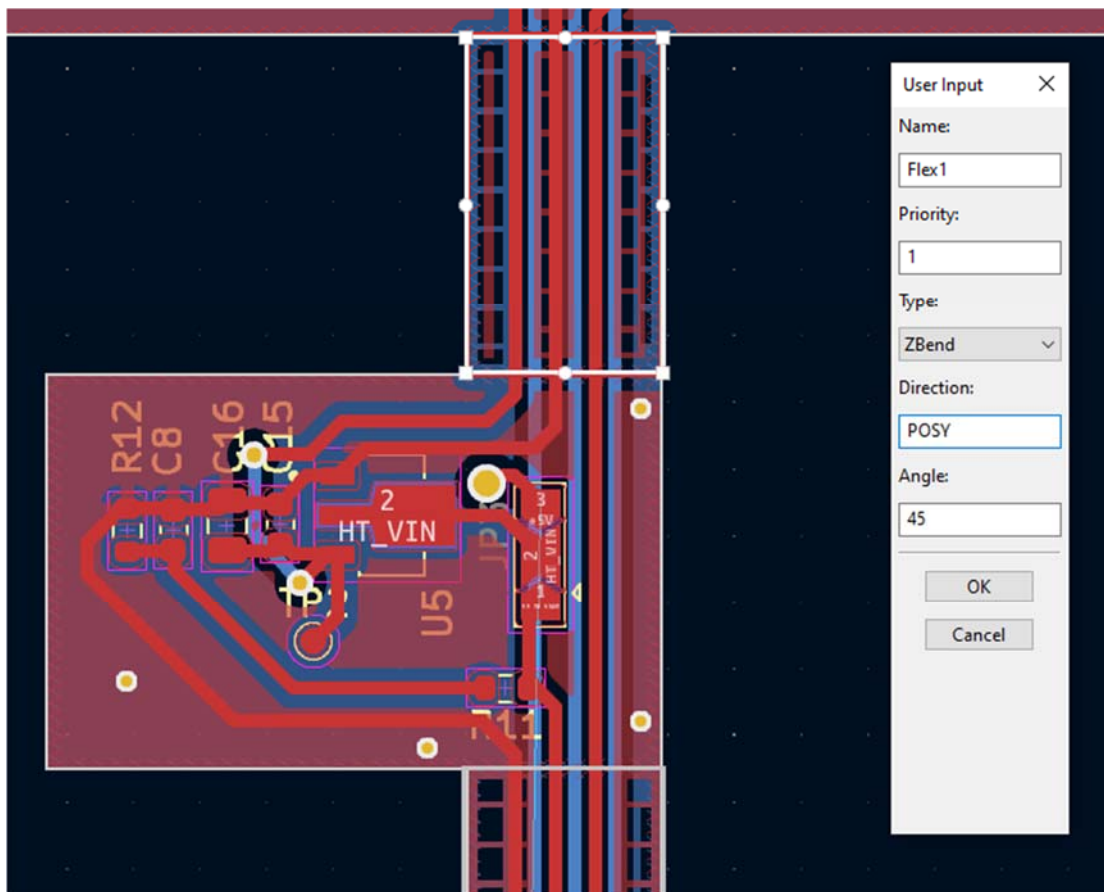


Abbildung 6: KiCad-Tool für FTL

1.3.2 Geometrieverarbeitung

Für FTL wurde eine eigene Geometrie-Engine geschrieben, die auf gmsh aufsetzt. Diese bietet einfachen Zugriff auf sämtliche Funktionen und ermöglicht folgende Verbesserungen:

- Größere Kontrolle über generierte Geometrien,
- Geometriespezifische Verfeinerungsmöglichkeiten und
- Generieren von geometrischen Gruppen, um bestimmten Geometrien innerhalb einer Simulation Materialien oder Randbedingungen zuordnen zu können.

1.3.2.1 Verarbeitung von KiCad-Dateien

Bei KiCad-Dateien beginnt der Prozess mit dem Design der Schaltung als flache Leiterplatte in KiCad selbst. Die Software bietet dabei wichtige Validierungswerkzeuge wie Design Rule Check (DRC), Electrical Rule Check (ERC), Layout vs. Schematic Test (LVS) und SPICE-Simulationen, die bereits in der Designphase potenzielle Probleme identifizieren. Das entwickelte Plugin ermöglicht es Usern, Biegebereiche zu definieren und deren Parameter anzupassen. Dies geschieht durch das Zeichnen von

Rechtecken und Polygonen auf einer dedizierten Ebene, wobei der Transformationsbereich durch die geometrischen Grenzen dieser Formen definiert wird.

Die Transformationsdaten werden in eine JSON-Datei exportiert, die von FTL weiterverarbeitet werden kann.

Der Aufbau des FPC („Stackup“) wird dabei direkt aus den KiCad-Layoutdaten gelesen. Basierend auf dieser Information werden nun die einzelnen Ebenen des Layouts entsprechend ihrer Dicke im Stackup extrudiert und anschließend gestapelt. Damit entsteht ein 3D-Modell der Platine, das im anschließenden Preprocessing zu einer einzigen, konformen Geometrie verarbeitet wird. Diese kann im Anschluss vernetzt und danach anhand der exportierten Daten gebogen und simuliert werden (Abbildung 7).

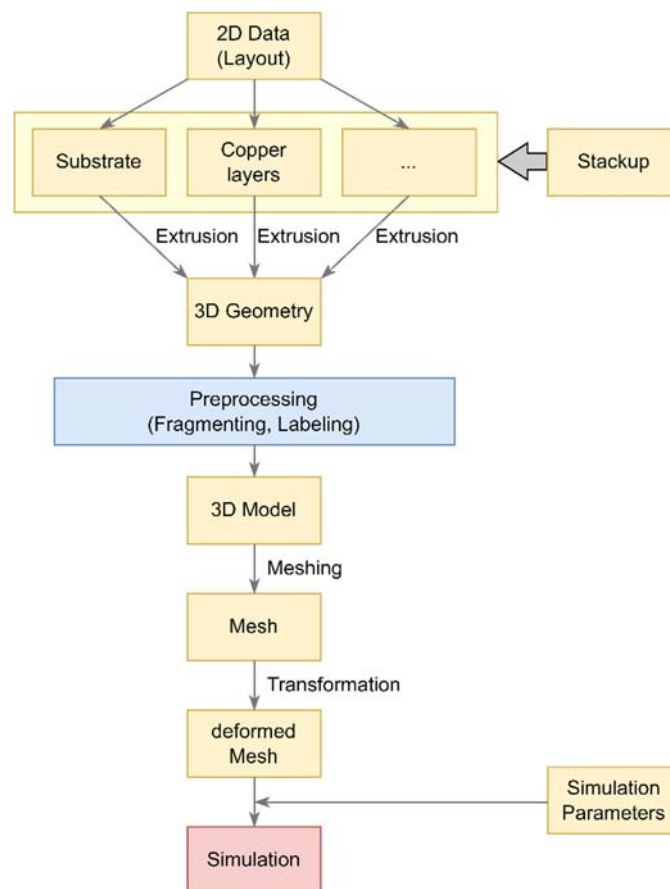


Abbildung 7: Workflow für KiCad-Dateien

1.3.2.2 Verarbeitung von anderen CAD-Dateien

Neben der genannten Möglichkeit gibt es auch Unterstützung für andere mit CAD-Programmen erstellte Daten wie bspw. DXF oder GDSII.

Dabei verwendet FTL ein speziell entwickeltes DXF-Reader-Modul, das gmsh-Geometrien aus den einzelnen Ebenen der DXF-Datei generiert. Da die in diesen Dateitypen enthaltenen von Natur aus zweidimensional sind, müssen sie extrudiert

und in Richtung der z-Achse gestapelt werden, um ein dreidimensionales Modell der flexiblen Leiterplatte zu erstellen. Ein besonderer Vorteil des DXF-Formats ist seine breite Unterstützung durch verschiedene CAD-Programme, was es Usern ermöglicht, Schaltungsstrukturen auch mit mechanischen CAD-Programmen zu zeichnen. Alternativ kann das GDSII-Format verwendet werden, das auch von KLayout unterstützt wird. Die Herangehensweise des Programmes ist dabei ähnlich. Unabhängig vom Eingangsformat folgt die Geometrieverarbeitung einem strukturierten Ablauf. Die Geometrien werden durch systematisches Traversieren der Ebenen von unten nach oben entsprechend den angegebenen Stackup-Daten gerendert. Diese und weitere Parameter werden dabei aus einer YAML-Datei gelesen. Für die prozessspezifische Darstellung werden Technologieklassen verwendet, die Informationen über Dicken, Materialien und zusätzliche Parameter des Herstellungsprozesses enthalten wie in Abbildung 8 gezeigt.

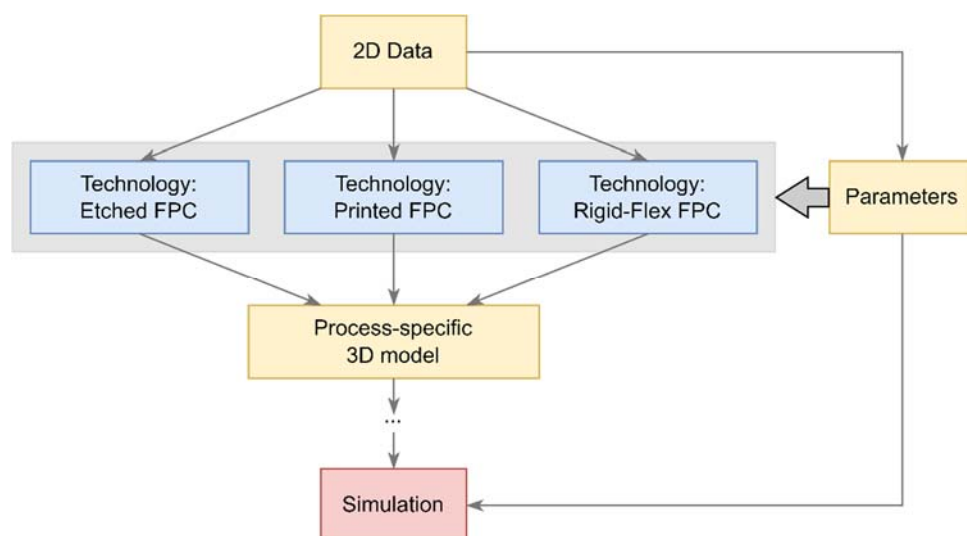


Abbildung 8: Technologieabhängige Geometrie-Erstellung

Ein wichtiger Vorteil dieses Ansatzes ist die Kompaktheit und Vollständigkeit: Parameter müssen nicht für jedes einzelne Modell definiert werden, und die Verwaltung technologischer Parameter wird durch ihre Konsistenz über alle Projekte hinweg vereinfacht. Zudem ermöglicht dieser Ansatz das Rendering eines Modells für mehrere Technologien aus einer einzigen Eingangsgeometrie.

Ein wichtiger Verarbeitungsschritt ist das *Preprocessing*, bei dem die Netz-Konsistenz an den Schnittstellen zwischen Komponenten sichergestellt wird. Dies geschieht durch die *Boolean Fragments*-Funktion in gmsH, die sich überlappende Oberflächen durch eine einzelne neue, in allen beteiligten Komponenten vorhandene Oberfläche ersetzt. Während dieses Prozesses werden Gruppen erstellt, die für die Zuweisung von Materialien, Anfangsbedingungen oder Kräften zu spezifischen Komponenten oder Oberflächen wichtig sind (siehe Abbildung 9). Dies geschieht ohne weiteres Zutun oder Intervention der User. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 10 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu sehen: Ein Bauelement wird auf einer Platine platziert. Wird dieses nach dem Preprocessing ausgeblendet, so ist auf der Platine ein „Abdruck“ sichtbar, der durch die Fragmentierung entstanden ist.

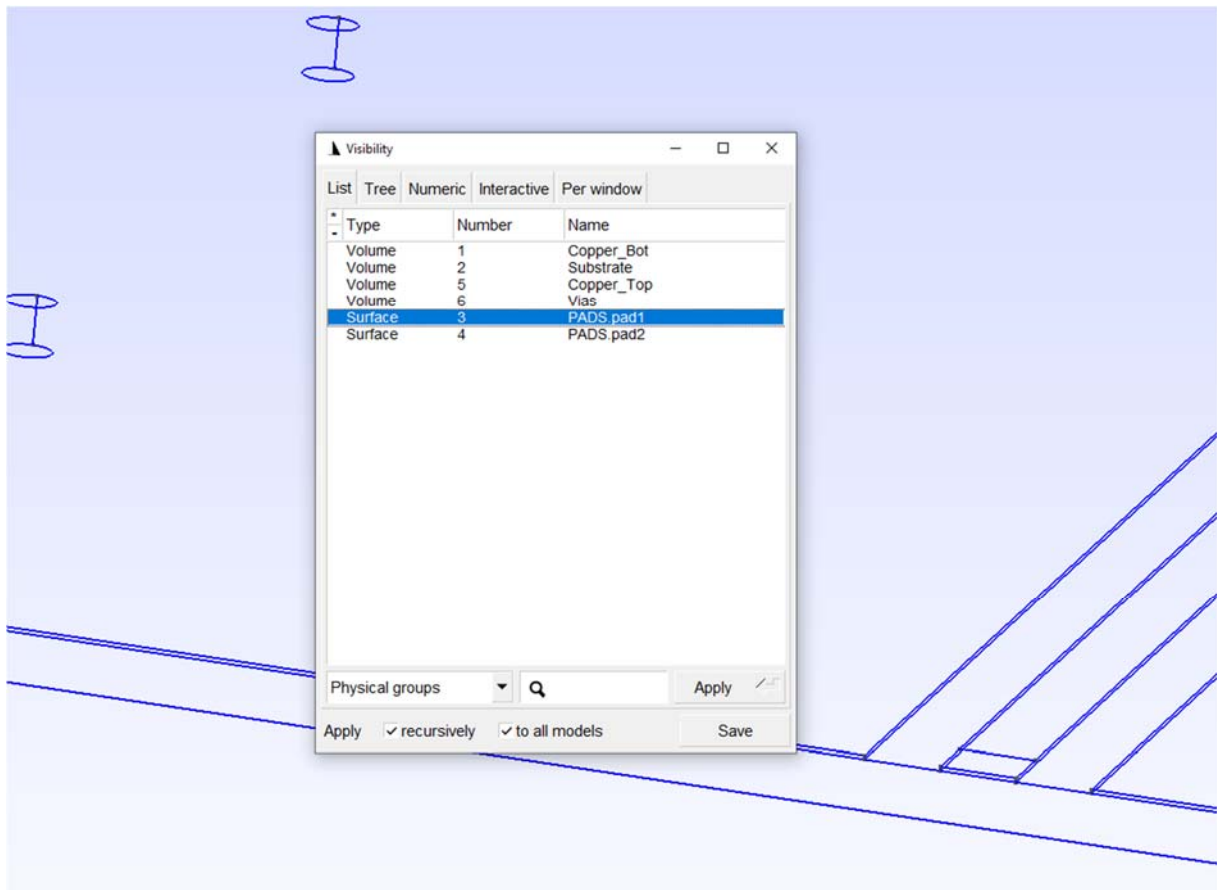


Abbildung 9: Erzeugung geometrischer Gruppen

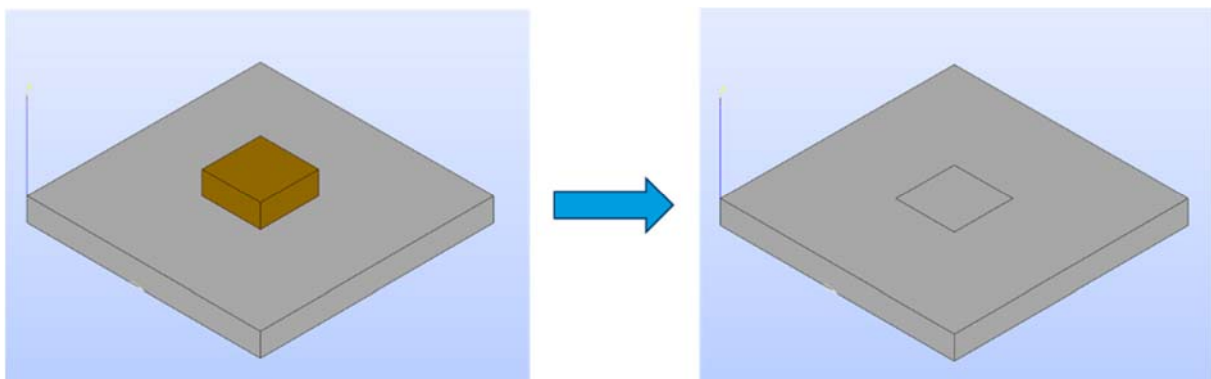


Abbildung 10: Fragmentierung von Geometrien

1.3.2.3 Biegen von Geometrien

Nach der Geometriegenerierung erfolgt die automatische Mesh-Generierung durch die integrierte gmsh-Bibliothek, wobei physikalische Gruppen für verschiedene Komponenten, Pads und andere Merkmale automatisch erstellt werden. Die resultierenden 3D-Modelle können dann in verschiedenen Formaten für die weitere Simulation und Analyse exportiert werden.

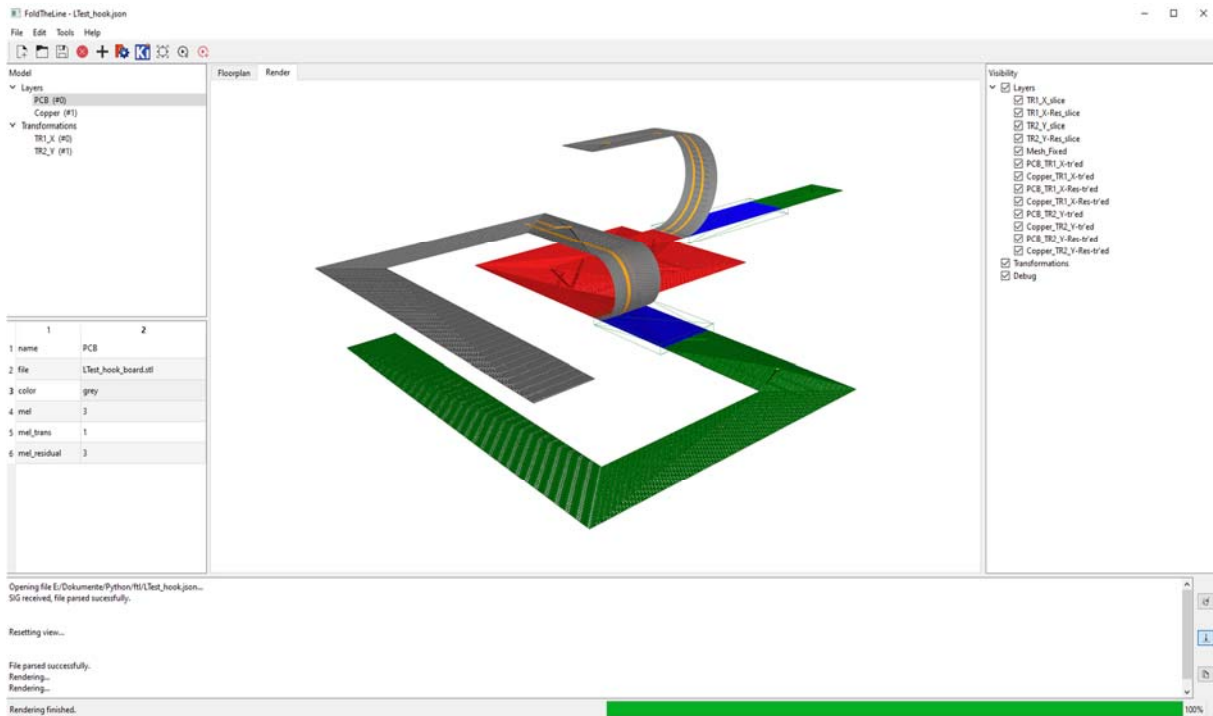


Abbildung 11: FTL-Hauptansicht

Das Open-Source-Tool "Fold the Line" (FTL; Abbildung 11) bietet einen innovativen Ansatz zur Generierung und Verarbeitung von Geometrien für flexible elektronische Systeme. Der grundlegende Prozess beginnt mit der Verarbeitung von zweidimensionalen Layoutdaten, die aus verschiedenen Quellen wie KiCad-Layouts, Gerber-Dateien oder DXF-Formaten stammen können. Diese Flexibilität bei den Eingangsformaten macht FTL zu einem vielseitigen Werkzeug für unterschiedliche Designworkflows.

Die Geometrieverarbeitung folgt einem strukturierten Ablauf, bei dem zunächst die flachen Layoutdaten in dreidimensionale Objekte umgewandelt werden. Dabei berücksichtigt FTL automatisch den Aufbau der Leiterplatte und erstellt ein vollständiges 3D-Modell aller relevanten Lagen. Die Software ermöglicht es dann, diese 3D-Modelle entsprechend den Anforderungen der jeweiligen Anwendung zu verformen, wobei verschiedene Transformationsarten wie Biegen oder spiralförmige Verformungen möglich sind.

Ein besonderer Vorteil von FTL liegt in der integrierten Mesh-Generierung, die die Abhängigkeit von externen Programmen eliminiert. Das Tool erstellt automatisch Netzstrukturen für die spätere Simulation und organisiert die Geometrien in funktionale Gruppen, was die weitere Verarbeitung und Analyse erheblich vereinfacht.

Die Transformation von der flachen FPC in ihre endgültige Form wird durch benutzerdefinierte Parameter gesteuert. Dabei berechnet FTL nach dem Meshing für jeden Knoten des generierten Netzes den Biegewinkel und verwendet eine Koordinatentransformationsmatrix zur Berechnung der neuen Positionen. Fortgeschrittene Transformationen ermöglichen auch das Biegen entlang von Linien, die nicht parallel zur x- oder y-Achse verlaufen sowie das Spiralisieren, was zusätzliche Berechnungen erfordert.

Das Ergebnis dieser Verarbeitungsschritte ist ein vollständig simulationsfähiges 3D-Modell, das für weitere Analysen in verschiedenen Simulationstools verwendet werden kann. Dazu kann FTL das Modell in verschiedene von gmsh unterstützte Formate exportieren, wodurch eine direkte Verwendung in verschiedenen Simulations-Tools ermöglicht wird. FTL soll in Zukunft auch die Vorbereitung der Modelle für verschiedene Arten von Simulationen unterstützen, von thermischen Analysen bis hin zu Hochfrequenzuntersuchungen. Durch diesen durchgängigen Workflow von der Geometrieerzeugung bis zur Simulationsvorbereitung würde FTL den Entwicklungsprozess flexibler elektronischer Systeme erheblich vereinfachen und fortschrittliche Designmethoden auch für kleinere Projekte zugänglich machen.

1.3.3 Simulationsfähigkeiten

1.3.3.1 RF-Simulationen

Die RF-Simulationen ermöglichen eine umfassende Analyse der elektrischen Eigenschaften:

- **Analysemöglichkeiten:**
 - Berechnung von S-Parametern und Impedanzen,
 - Analyse von Signalintegrität und EMV und
 - Optimierung von Abschirmungen und Leiterbahngeometrien

1.3.3.2 Thermische Simulationen

Die thermischen Analysen sind besonders wichtig für medizinische Anwendungen:

- **Simulationsergebnisse:**
 - Temperaturverteilung in gebogenen Verdrahtungsträgern,
 - Berücksichtigung externer Komponenten möglich,
 - Wärmefluss an kritischen Komponenten und
 - Analyse der thermischen Belastung von Materialien.

1.4 Anwendungsfälle und Demonstratoren

1.4.1 Schrittmacherkabel-Extraktionsvorrichtungen – Philips Usecase

Die Hauptanwendung der hier entwickelten Technologien lag im Usecase von Philips Electronics mit dem Ziel der Entwicklung eines Katheters zur Extraktion von Herzschrittmacher-Elektroden aus dem Körper. Dabei wurde ein langer Stripe entwickelt, der sowohl als Anschluss für die Ultraschallköpfe (distales Ende) als auch für die Auswerteelektronik (proximales Ende) fungieren und dabei Signale sowie Versorgungsspannung überträgt. Dieser Stripe wird dann um den Katheter gewickelt und versiegelt – dadurch entsteht ein Hohlraum im Inneren, der die extrahierte Elektrode aufnehmen kann. Mit den neuen Entwurfsmethoden wurden ermöglicht:

- Integration flexibler Elektronik in medizinische Instrumente,
- Optimierung der Signalübertragung in gebogenen Zuständen und
- Validierung durch mechanische und elektrische Tests.

1.4.2 IoT-Demonstrator

Das im Rahmen des HyPerStripes-Projekts entwickelte Demonstrator-Modul (Abbildung 12) basiert auf dem ESP32-H2 System-on-a-Chip und demonstriert die Möglichkeiten flexibler Elektronik in praktischen Anwendungen. Das Modul wurde speziell für die Erfassung und drahtlose Übertragung von Umgebungsdaten konzipiert und integriert verschiedene Komponenten auf einem flexiblen Substrat.

Die Kernkomponenten umfassen den ESP32-H2 Prozessor, einen BME280 Temperatur- und Feuchtigkeitssensor sowie einen Low Dropout (LDO) Spannungsregler für die USB-Stromversorgung. Die drahtlose Datenübertragung erfolgt über das ZigBee-Protokoll an eine Basisstation. Somit können die Daten unabhängig von dieser erfasst und gesendet werden, sodass keine Verkabelung in den zu messenden Raum nötig ist.

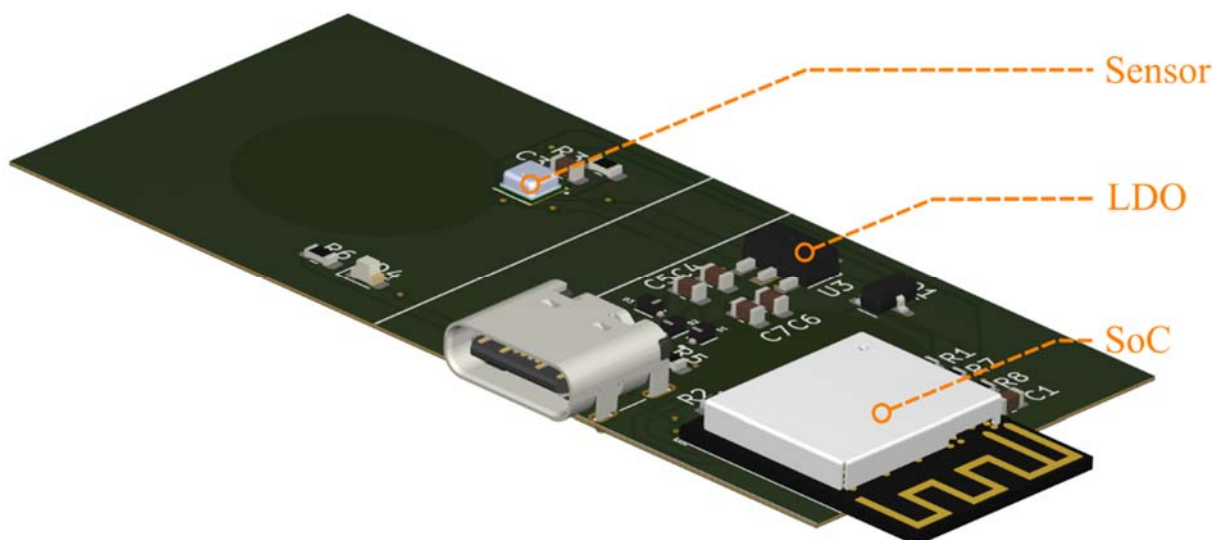


Abbildung 12: Demonstrator in gerader Form

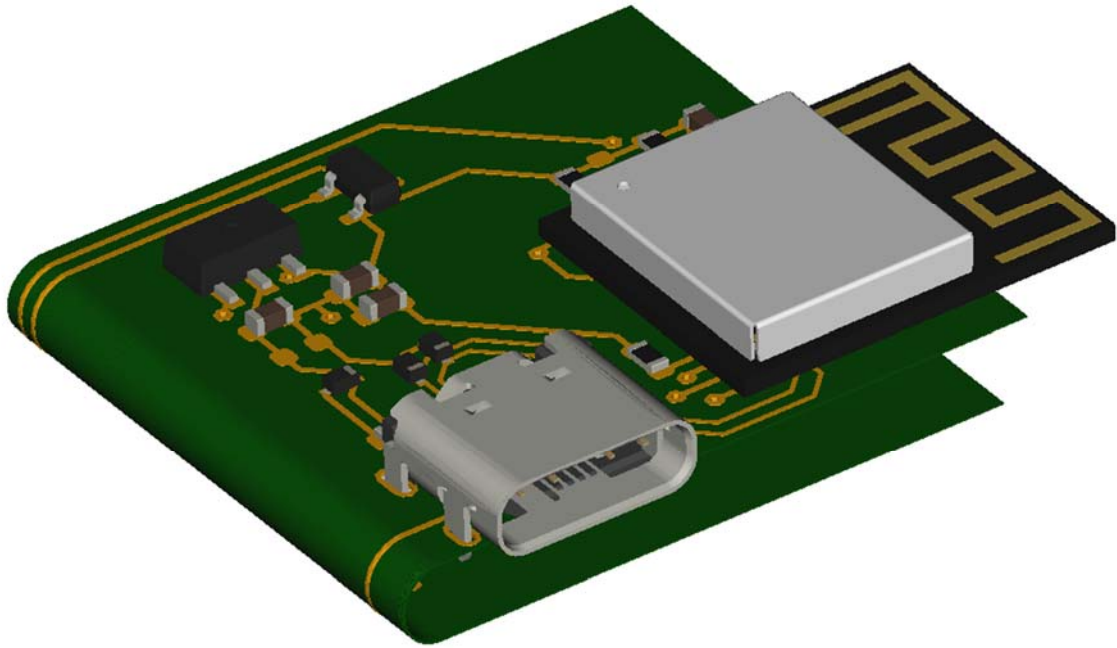


Abbildung 13: Demonstrator in gebogener Form

Als primäre Energiequelle dient eine CR2032 Lithium-Knopfzelle. Eine Besonderheit des Designs ist die Fähigkeit, sich um die CR2032-Batterie zu biegen, wodurch ein separater Batteriehalter überflüssig wird und die Gesamtabmessungen minimiert werden sollen (Abbildung 13). Allerdings birgt diese Methode ein verstecktes Risiko: Die durch LDO und Prozessor erzeugte Abwärme kann durch die Knopfzelle direkt auf die Unterseite der Baugruppe gelangen, wo der Sensor sitzt. Dadurch ergibt sich eine Abweichung vom realen Messwert, da die Temperatur des Sensors durch die Baugruppe selbst beeinflusst wird.

Dieser Einfluss ließ sich auch in Simulationen nachweisen. Dazu wurde die Platine unter den gleichen Randbedingungen einmal in ihrer geraden und einmal in ihrer gebogenen Form mitsamt der Knopfzelle simuliert. Die Ergebnisse (Abbildung 14 bis Abbildung 18) zeigten, dass die gebogene Konfiguration eine deutliche Erhöhung der gemessenen Temperatur verursacht: Die Temperatur am BME280-Sensor steigt durch die Wärmeleitung über die Knopfzelle um fast 2 K im Gegensatz zur geraden Version. Mithilfe des Tools ParaView kann ebenso visualisiert werden, wie sich der Wärmefluss auf der Platine verhält (Abbildung 15).

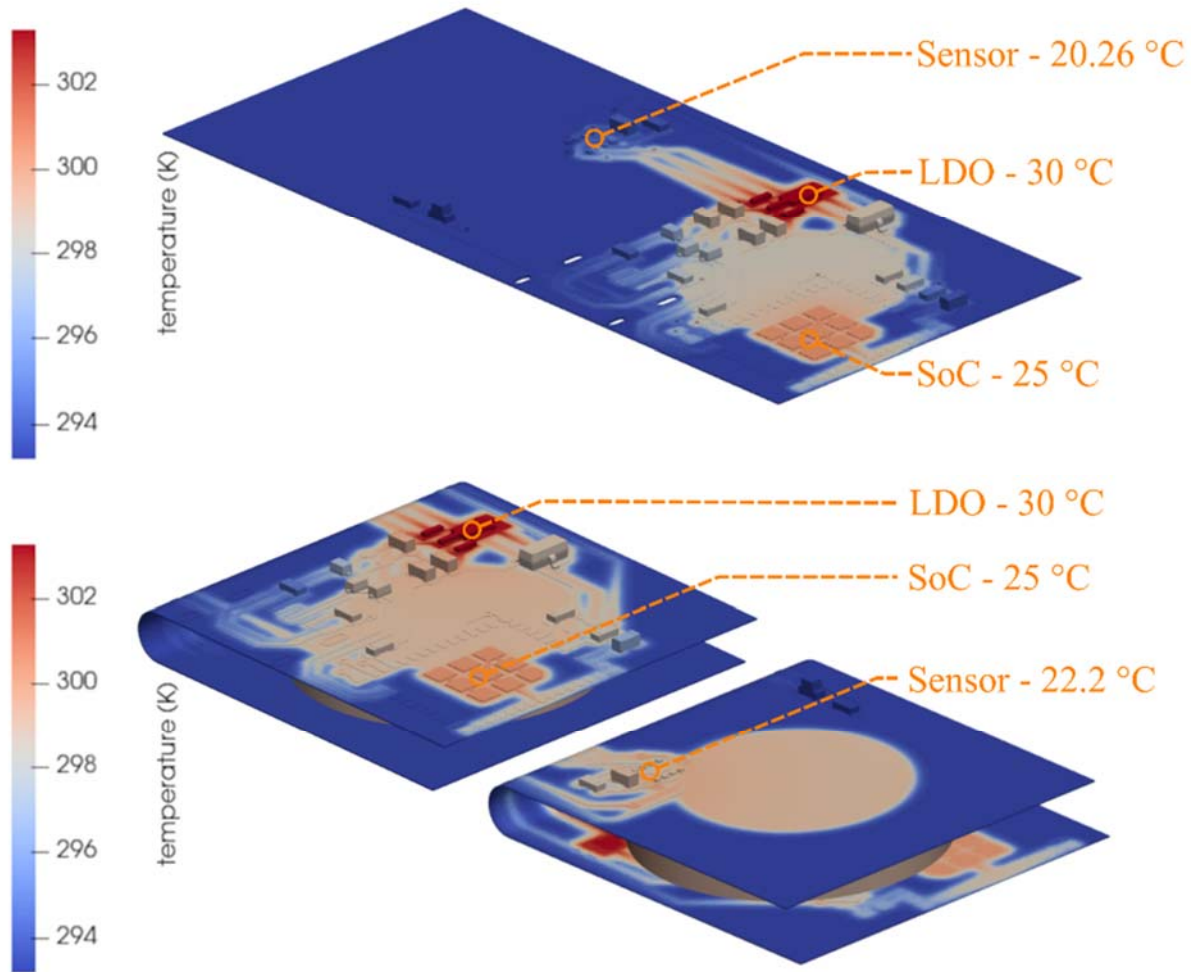


Abbildung 14: Thermische Simulation des Demonstrators

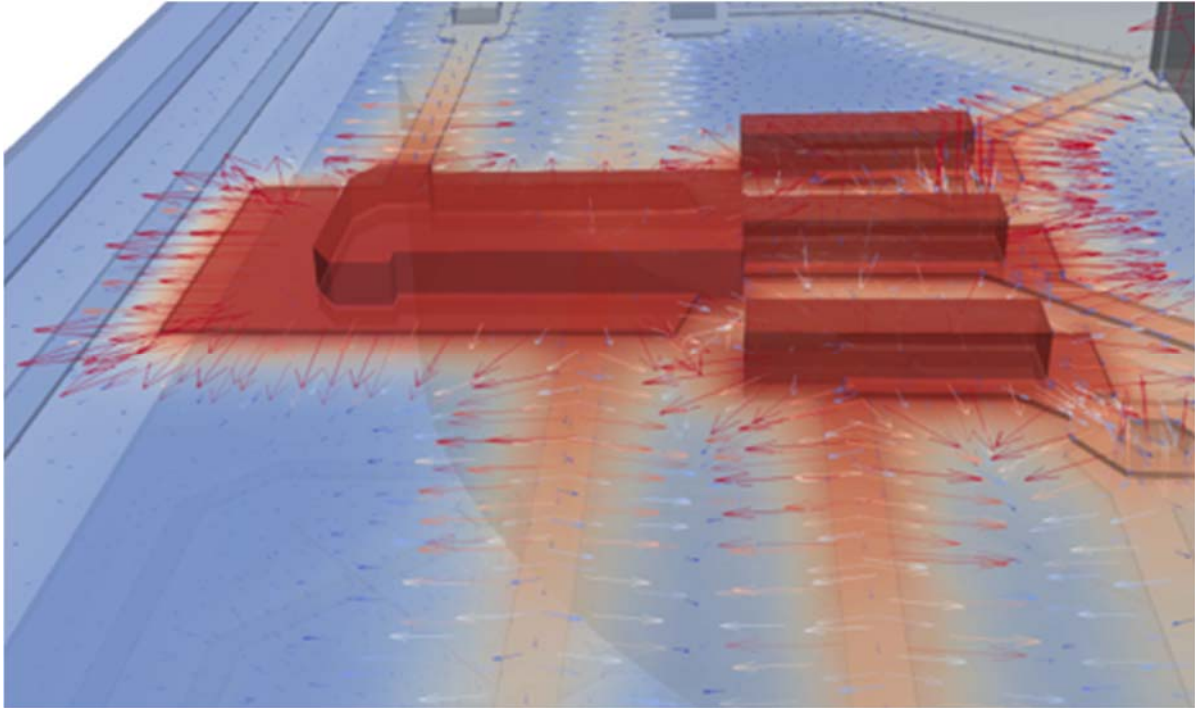


Abbildung 15: Visualisierung des Wärmeflusses

Anhand der durchgeführten Simulationen und Visualisierungen lassen sich Probleme und Nachteile der Baugruppe bereits im Design-Prozess aufzeigen und analysieren. Das gezeigte Beispiel demonstriert somit erfolgreich die Möglichkeiten der Simulation flexibler Platinen mit FTL.

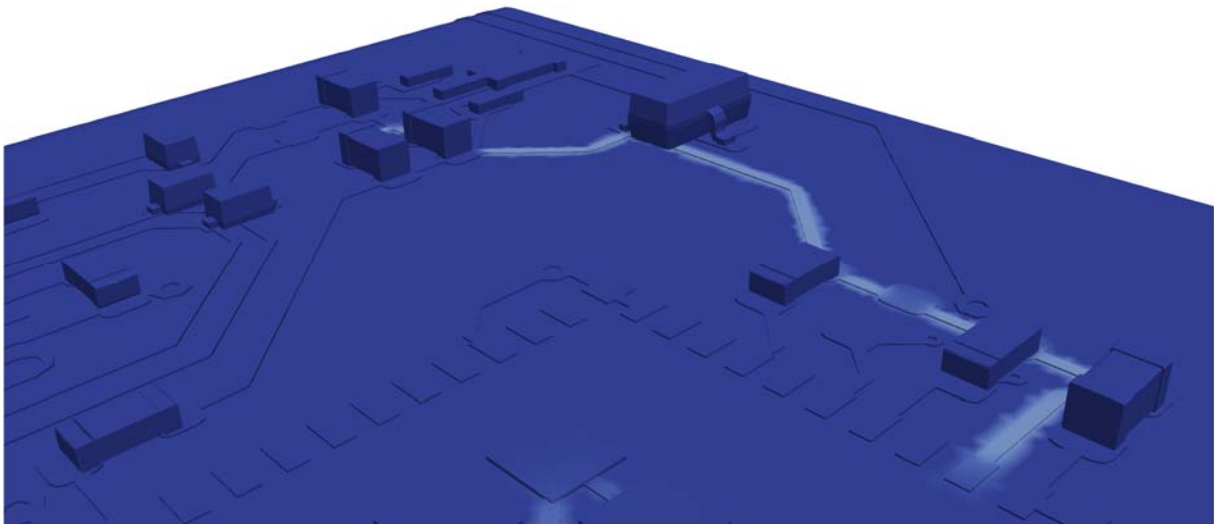


Abbildung 16: Stromdichte-Simulation

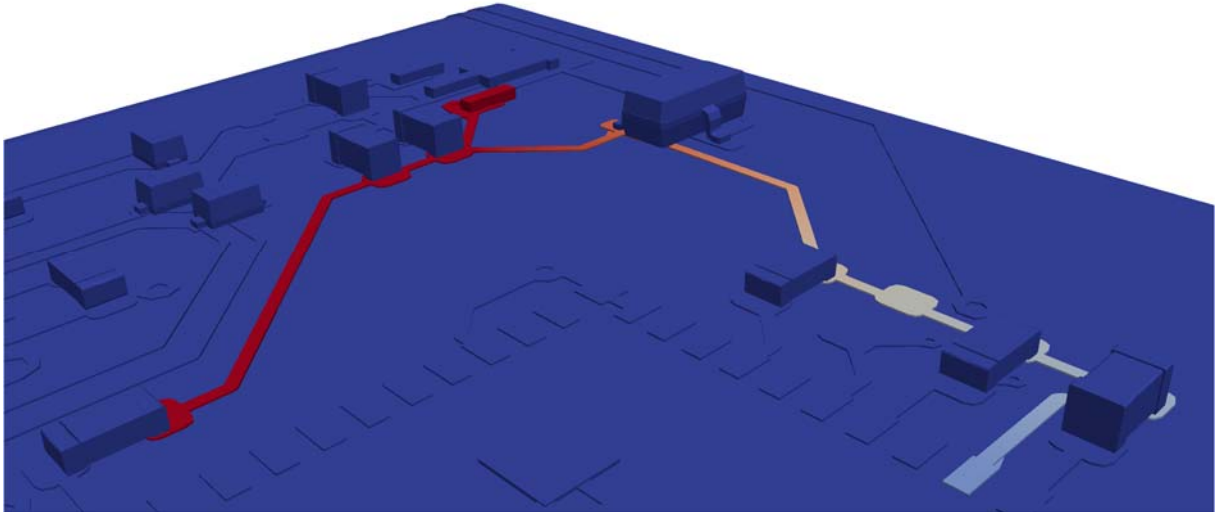


Abbildung 17: Potential im Leiter zur Visualisierung des Spannungsabfalls

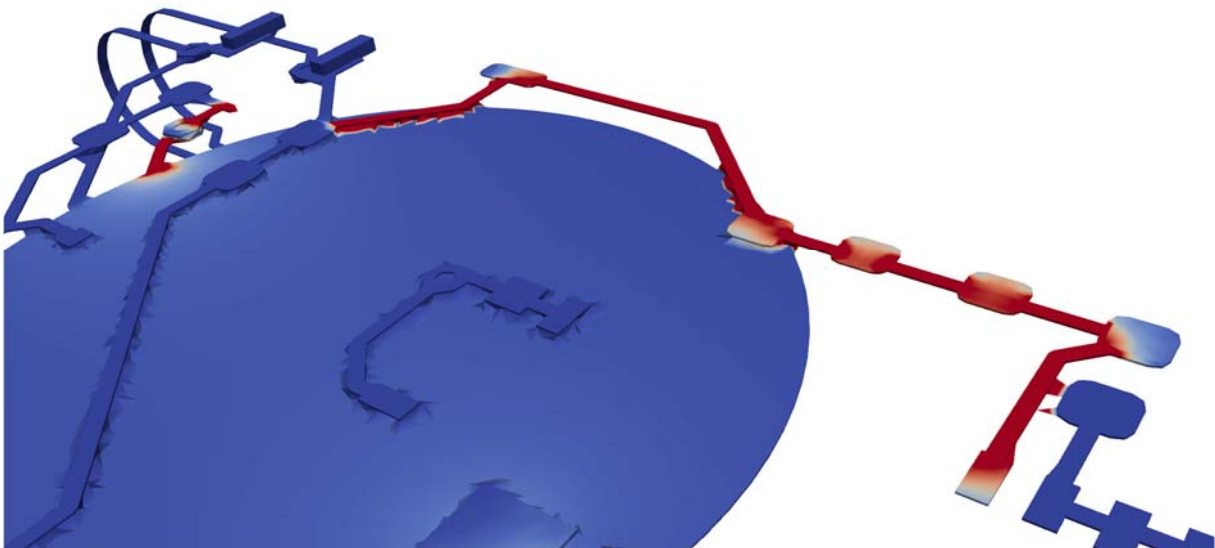


Abbildung 18: Simulation des Spannungsabfalls mit ausgeblendetem Substrat

1.5 Ausblick

- Verbesserungen am Tool FTL:
 - Bessere Unterstützung für noch komplexere Transformationen und
 - Vorbereitung sowie ggf. Auswertung von Simulationen direkt im Tool
- Dokumentation des Tools für bessere Nachvollziehbarkeit
- Einbeziehung der KiCad-Community in die Weiterentwicklung

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Es gab folgende wichtige Positionen der Finanzierung im Teilprojekt:

- Personal
- Reisekosten.

Insgesamt wurden zwei Mitarbeiter mit akademischem Abschluss eingesetzt: ein erfahrener Kollege und ein neu eingestellter Kollege. Beide bildet ein sehr gutes Team. Der neu eingestellte Absolvent war Vollzeit beschäftigt. Der ältere, erfahrende Kollege war im Projekt nur Teilzeit beschäftigt. Die beiden Kollegen teilten sich die Forschungsarbeiten, wobei jeder seine speziellen Fähigkeiten einsetzte. Die wichtigsten Aufgaben waren

- Entwicklung fortschrittlicher Simulationsmöglichkeiten
- Integration von Simulationswerkzeugen in den Designprozess
- Validierung der entwickelten Tools durch Industriepartner

Daneben galt es einen engen Austausch zwischen den deutschen und europäischen Partnern aufrecht zu erhalten, um die erforderlichen Informationen zu den Spezifikationen der Anwendungen sowie zu den Möglichkeiten der Herstellungstechnologien zu erhalten.

Die Reisekosten dienten zur Finanzierung der notwendigen Dienstreisen, um diesen Austausch der Erkenntnisse aus der Forschung voranzutreiben. Dabei standen folgende Themen im Vordergrund:

- Anforderungen an die Simulation des elektronischen Systems
- Varianten der Biegung, Krümmung oder dgl. der flexiblen Elektronik
- Anforderungen aus den Anwendungen zur Verifikation des formveränderten Systems
- Die Nutzerfreundlichkeit der grafischen Oberfläche ständig zu verbessern.

Außerdem war die Teilnahme an den Projekttreffen enorm wichtig, um sich über den Stand der Arbeiten bei den anderen Partnern zu informieren. Damit konnte eine Synchronisierung der Forschung garantiert werden.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Um die Forschungsaufgaben durchführen zu können, waren der Einsatz qualifizierter Mitarbeiter erforderlich. Es wurden dazu zwei Kollegen eingestellt. Der ältere Kollege brachte die Erfahrung aus der Projektarbeit in europäischen Projekten sowie aus dem Entwurf von elektronischen bzw. mikroelektronischen Systemen mit. Der jüngere Kollege war ein Absolvent, der sich sehr schnell in die Problematik einarbeitete und neueste Techniken der Programmierung mitbrachte. Dadurch war ein kleines Team vorhanden, das die notwendigen Kenntnisse und Fähigkeiten für die Bewältigung der komplexen Aufgabenstellung hervorragend überstrich. Dadurch konnten die gestellten Aufgaben mit hoher Sachkompetenz und hoher Qualität bei hoher Effizienz der Forschungsarbeiten bearbeitet werden. Aufgrund der Vielfalt und Komplexität der Aufgabe, Berücksichtigung der Eigenschaften der flexiblen Elektronik aus der

Formgebung wurden sowohl neue Algorithmen ausgearbeitet als auch Erweiterungen im vorhandenen Toolumfeld vorgenommen. Dazu mussten neue Algorithmen erforscht und für die Integration in die Entwurfsabläufe bzw. zum Anschluss an vorhandene Werkzeuge aufbereitet werden. Eine neue grafische Oberfläche für die Designer wurde erstellt, um den Nutzern der neuen Entwurfsverfahren von einer langwierigen Einarbeitung zu entlasten.

Das Team der TU Dresden /IFTE war hinsichtlich der genannten Aufgaben personell exzellent aufgestellt. Das Team verkörperte das notwendige Knowhow und konnte aufgrund der veranschlagten Personenmonate alle angestrebten Zielstellung mindestens in der vorgegebenen Qualität erreichen. Die neuen Entwurfsverfahren zeichnen sich durch

- einfache, zum großen Teil selbsterklärende grafische Oberflächen,
- durch stabile, schnelle und effektive Entwurfsverfahren sowie
- durch Berücksichtigung der Anforderungen aus den Anwendungen aus.

Mit dem Reisebudget konnte alle notwendigen Dienstreisen absolviert werden. Nützlich und erforderlich waren die Reisen zu den Projekttreffen, die halbjährlich stattfanden sowie Reisen zu Projektpartnern zur Lösung bestimmter Probleme. Es fanden regelmäßig Treffen zu bestimmten Problemen aus dem Projekt statt. Somit konnte die Kommunikation aufrechterhalten und die Zusammenarbeit exzellent absolviert werden.

4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses und der Erfahrungen

A) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die TU Dresden ist eine staatliche Bildungs- und Forschungseinrichtung und strebt selbst nicht unmittelbar Gewinne und Umsätze aus den Projektergebnissen an. Für die TU Dresden ist die Zusammenarbeit mit Industriepartnern, aber auch mit anderen akademischen Forschungspartnern, von enormer Bedeutung. Dies erlaubt ihr, erzielte Forschungsergebnisse zusammen mit Industriepartnern zu vermarkten und damit insbesondere die heimische Industrie zu unterstützen.

Aufgrund seiner oftmals industriefinanzierten Forschung pflegt das Institut IFTE der TU Dresden seit seiner Gründung engen Kontakt zu Industrieunternehmen, womit die Bedürfnisse und Anforderungen der Industrie gut bekannt sind. Mit dem Projekt werden diese Beziehungen sowohl national als auch europäisch ausgebaut. Letztlich lassen sich sowohl für das Institut als auch für die TU Dresden mit den Projektergebnissen deren Wissensbasis erweitern, was neben dem Lehraspekt (einfließen in das Lehrangebot) zukünftigen Forschungsangeboten an die Industrie zugutekommt. Dabei werden folgende Aspekte eine entscheidende Rolle spielen:

- Unterstützung bei der Erstellung von Entwurfsregeln für Technologien der flexiblen Elektronik

- Übernahme von Werkzeugerweiterungen (Tool-Support) und Designaufgaben für kleine und mittelständische Firmen
- Weiterbildung von Experten aus der Industrie
- Einführung und Weitergabe der Entwurfsmethodik zur flexiblen Elektronik.

Damit geht das Institut konsequent den Weg, in zukunftssträchtige Technologien zu investieren. Die Integration auf flexiblen Substraten ist für neuartige heterogene Systeme, die auf verschiedene Bauelemente, wie Sensoren, Transistoren, passive Bauelemente, aufbauen, ideal geeignet. Gerade in Deutschland sind Sensorsysteme eine wichtige Komponente für viele erfolgreiche Produkte, z.B. in der Medizintechnik sowie der Industrie- und Gebäudeausrüstung. Hier sind auf engstem Raum unter Beachtung der minimierten Energieaufnahme verschiedene Sensoren mit hochintegrierten Mikrokontrollern und Speichern sowie Schnittstellen für die Hochfrequenzkommunikation in schwierigen räumlichen Anordnungen integriert. Dieser nach vielen Prognosen auch zukünftig stark wachsende Markt erschließt sich der TU Dresden durch dieses Projekt. Gleichzeitig kann die TU Dresden mittelständische Unternehmen bei der Einführung dieser neuen Technologien unterstützen, also selbst einen Beitrag zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie leisten.

Tabelle 1: Ziele der TU Dresden / IFTE

Zeitraumen	Jahr	Anwendung
kurzfristig	1	Umsetzung der Algorithmen in nutzbare Verfahren
		Projektpartner nutzen die neuen Entwurfsverfahren
		Vorstellung der Verfahren in Expertenkreisen
mittelfristig	2	Erste Nutzung außerhalb des Projektkonsortiums
	2	Dokumentation erstellen
	3	Erweiterung der Funktionalität auf neue Formen
langfristig	4	Kontakt zu EDA-Firmen hinsichtlich Kommerzialisierung aufnehmen
	5	Verbesserung der Algorithmen sowie Vereinfachung der Anwendung durch die Entwerfer
	5	Grundsätzliche Überarbeitung der Verfahren aufgrund der gewonnenen Erfahrungen

B) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Das IFTE der TU Dresden beschäftigt sich bereits seit einigen Jahren mit dem Entwurf zwei- und dreidimensionaler Anordnungen von integrierten Schaltkreisen, siehe z.B. [3] - [6]. Diese Arbeiten bilden einen der Forschungsschwerpunkte des Instituts. Ziel ist es dabei, die sich mit den technologischen Möglichkeiten der neuartigen innovativen Integrationsverfahren ergebenden Anwendungen, wie z.B. kompaktere Sensorsysteme, entwurfsmethodisch abzusichern. Beispielsweise wurde ein Entwurfsverfahren entwickelt, welches es erlaubt, konventionelle (2D) IP-Blöcke auch in 3D-Schaltkreisen zu implementieren, was zuvor an der durch sie erfolgenden

Blockierung der bei 3D-Schaltkreisen wichtigen Through-Silicon Vias (TSVs) scheiterte [4]. Damit liegen eine Vielzahl von Diplomarbeiten und auch einige Promotionen vor, auf deren Wissen die Projektarbeit aufbauen kann.

Eine besondere Herausforderung wird dabei die Darstellung sowie die Analyse der elektrischen Eigenschaften der Formgebung bereits während des Entwurfes sein. Dazu sind im Gegensatz zu den bisherigen Analysen, die sich stets auf die Substratebene bezogen, auch Beziehungen zwischen Bauelementen über die Substratebene hinaus zu betrachten. Dies bietet einen Ansatz, Studienarbeiten, Diplomarbeiten und eventuell eine Doktorarbeit zu installieren. Außerdem können die Projektergebnisse in die Lehre eingebracht werden, um frühzeitig spätere Ingenieure mit der neuen Technologie und ihren Möglichkeiten vertraut zu machen.

Zur Absicherung der notwendigen personellen Kapazität für das Projekt hat das IFTE, einen neuen Mitarbeiter eingestellt.

Der Leiter des Instituts, der gleichzeitig auch Lehrstuhlinhaber ist, ist auf dem Gebiet der Entwurfsmethodik für zwei- und dreidimensionale Anordnungen ein international anerkannter Experte. Neben der Herausgabe mehrerer Fachbücher zum zwei- und dreidimensionalen Entwurf hat er sich durch viele Veröffentlichungen in Zeitschriften und auf Konferenzen auf diesem Gebiet eine internationale Reputation erarbeitet, was sich auch durch die Einladung (Invited Talk, z. B. [4]) auf internationalen Konferenzen, zu diesem Thema zu referieren, manifestiert.

Insgesamt hat die TU Dresden ein fachlich kompetentes und motiviertes Team zur Erfüllung der hohen Ansprüche im Projekt. Die schon jetzt am IFTE existierende Forschungslandschaft sichert Qualität und Effektivität dieser Arbeiten ab. Beides gewährleistet, dass die TU Dresden alle gestellten Aufgaben aus dem Projekt auf wissenschaftlich hohem Niveau löste. Die wichtigsten Arbeitsziele sind

- Erfassen von nichtplanaren Strukturen´
- Grafische Darstellung der geformten Strukturen
- Anschluss an Simulatoren herstellen
- Stresserfassung (thermisch, mechanisch)
- Erfassen von gedehnten.

C) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Aus den Projektergebnissen heraus ergeben sich vielfältige Möglichkeiten der Nachnutzung für die TU Dresden. Dazu werden vorrangig Konferenzen, bilaterale Treffen und die Veranstaltungen von Silicon Saxony und VDE-Fachgruppen genutzt. Auf den nachfolgend genannten drei Gebieten lassen sich die Ergebnisse des Projektes effektiv verwerten.

a) Ausbildung

Die Projektergebnisse werden genutzt, um vorhandene Vorlesungen mit neuen Forschungsergebnissen aufzuwerten und damit ihre Lehrinhalte zukunftssträchtiger zu

machen. Damit werden die Studenten nicht nur eine fachlich kompetentere Ausbildung erhalten, sondern auch die neuen Integrationsmöglichkeiten als Wissen in die Industrie mitnehmen und so als Vervielfacher (Multiplikator) der Technologien und der Entwurfswerkzeuge wirken. Mit dem erworbenen Lehrwissen erhalten die Studenten auch bessere Möglichkeiten, sich als „wissensbringende“ Praktikanten in Unternehmen bereits im Studium anzubieten.

Gleichzeitig werden Angebote zur Weiterbildung von Experten angeboten, ebenso wie Veranstaltungen zur Vorstellung der neuen Technologien. Dies wird durch Weiterbildungsangebote, die sowohl in Firmen als auch an der TU Dresden durchgeführt werden können, erfolgen. Dazu werden entsprechende Lehrmaterialien (Tutorials) ausgearbeitet.

b) Forschung

Die Projektergebnisse sind die Basis für neue Forschungsangebote und -ziele. Es ist absehbar, dass die Ergebnisse des Projektes nur einen Teil der sich mit der neuen Technologie ergebenden Anwendungsmöglichkeiten abdecken, womit „neue Fragestellungen“ weitere Forschungsanforderungen erzeugen werden. Weiterhin müssen die aus dem Projekt hervorgehenden Entwurfsverfahren verbessert werden; auch ergeben sich aus der Kooperation mit den Anwendern der Technologie Anforderungen für neue Werkzeuge und Hilfsmittel zur Beherrschung der steigenden Komplexität. Mit dem Projektende tut sich aufgrund des völlig neuen Aspekts des Einbeziehens der Formgebung in den Entwurfsprozess eine neue Forschungslandschaft auf. Das Projekt selbst ist dabei der Startpunkt. In der Zeit nach dem Projekt werden sich weitere Forschungsaspekte auf tun:

- Andere Formgebungsverfahren
- Andere Endformen, die erfasst werden müssen
- Neue Technologien der Herstellung der flexiblen Elektronik
- Neue elektrische Eigenschaften sind zu untersuchen.

Mit dieser groben Übersicht sind viele Einzelaktivitäten verbunden, die eine reichhaltige Forschungslandschaft ergeben. Das Institut wird daher die Zusammenarbeit sowohl mit den Entwerfern von Systemen der flexiblen Elektronik und den Herstellern der flexiblen Elektronik als auch mit EDA-Firmen forcieren. Das Ziel ist einerseits neue Forschungsarbeiten besser an die notwendigen Forderungen aus der Industrie anzupassen und andererseits die Forschungsergebnisse auch in industriell nutzbare Verfahren umzuwandeln. Außerdem werden die Ergebnisse aus der Forschung in die Lehre integriert, womit für die Industrie der notwendige frühzeitig geschult wird. Ein anderer wichtiger Aspekt zur Forcierung der Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet wird die Bereitstellung der neuen Methoden und Verfahren als Open Source sein. Somit werden weitere Kontakte entstehen und viele Anregungen aus der Community kommen.

Dies wird auch zu neuen Forschungsaufgaben insbesondere im Grundlagenbereich (Komplexitätsbetrachtungen, Algorithmenentwicklungen, Datenstrukturen) führen, welche wiederum Studienarbeiten, Diplomarbeiten und Promotionen ermöglichen. Ausgehend von diesem Projekt ist also zukünftig eine Steigerung der Breite als auch der Qualität der Forschung zu erwarten. Da derartige Grundlagenforschung sich gut für Publikationen eignet, ist mit einer Vielzahl von Veröffentlichungen auf

internationalen Tagungen bzw. in internationalen Zeitschriften zu rechnen. Entsprechend wird auch das Ansehen des Instituts und der TU Dresden aufgewertet.

c) Industrieprojekte

Die Möglichkeiten des Instituts für gemeinsame Projekte mit der Industrie werden sich wesentlich verbessern. Es lässt sich schon jetzt absehen, dass die Ergebnisse des Projektes nur einen Teil der sich mit der neuen Technologie ergebenden Anwendungsmöglichkeiten abdecken, womit sich „aus den Marktbedürfnissen heraus“ neue Industriekooperationen (und damit Industrieprojekte) ergeben. Auch erhöht sich durch die Vergrößerung der Wissensbasis die Flexibilität des IFTE beim Einstieg in Industrieprojekte, womit sich mehr Möglichkeiten für Angebote an die Industrie für gemeinsame Förderprojekte und/oder neue Kooperationsprojekte ergeben. Erfahrungsgemäß wird die Zusammenarbeit mit der Industrie auch die Forschung und die Lehre positiv beeinflussen. Hinzu kommt, dass durch mehr drittmittelfinanzierte Mitarbeiter die sich durch Synergieeffekte ergebenden Wissensvorteile des Instituts verstärken.

Die schon jetzt existierende Kooperation des Instituts mit EDA-Firmen (d.h. den CAD-Tool-Herstellern) sollte es erlauben, deren Chancen für eine Vermarktung der entwickelten Verfahren abzuschätzen und langfristig eine Markteinführung zu ermöglichen. Durch das im Projekt akkumulierte Wissen auf diesem Gebiet kommt dem Institut hierbei eine Schlüsselrolle zu, was sich durch entsprechende Aufträge dieser Firmen an das IFTE äußern wird.

5 Bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet der Entwurfsmethodik für flexible Elektronik

International gibt es Aktivitäten zur Entwicklung von neuen Analyseverfahren für flexible Elektronik. Die Forschungsansätze beschränken sich auf Einzellösungen. Ein Gesamtansatz zu der flexiblen Elektronik, wie im Projekt angestrebt worden ist, ist nicht bekannt. Die kommerziellen Tools sind in ihrem Einsatz sehr beschränkt. Open Source Ansätze sind nicht bekannt.

6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

A) Erfolgte Veröffentlichungen:

Auf den Projekttreffen wurden die Ergebnisse den anderen Partnern vorgestellt. Außerdem wurden die neuen Entwurfsverfahren für die Darstellung des Projektes auf den Kolloquien des Instituts sowie in der VDE/ITG-Fachgruppe Layout Experten vorgestellt. Ein besonderes Highlight war der Erfahrungsaustausch mit Experten auf

der 6th IFETC Conference Konferenz. Dort konnten auch die Ergebnisse aus dem Projekt einem internationalen Publikum vorgestellt werden und ein Feedback von anderen Experten gewonnen werden.

Titel der Präsentation:

Die Projektergebnisse wurden auch intern mehrmals auf dem monatlichen Kolloquium des Instituts vorgestellt. das Kolloquium ist öffentlich auch für Nichtangehörige der TU Dresden zugänglich.

Im Einzelnen wurden folgende Vorträge und Veröffentlichungen getätigt:

- N. Arnold, A. Krinke, M. Dietrich and J. Lienig, "An Open-Source Tool for FEM Modeling of Bent Flexible Circuits," in *IEEE Journal on Flexible Electronics*, vol. 4, no. 8, pp. 333-341, Aug. 2025.
doi: [10.1109/JFLEX.2025.3594658](https://doi.org/10.1109/JFLEX.2025.3594658).
- N. Arnold, "Please, Fold the Line: Designing Flexible Electronics Using Open-Source Software," Poster, Microprinting 2025, Bad Schandau, Germany, 25.-27. August 2025.
- N. Arnold, "Simulation flexibler Leiterplatten mit Open-Source-Software," Vortrag, 277. IFTE-Institutskolloquium, Dresden, 14. Februar, 2025.
- N. Arnold, A. Krinke, M. Dietrich, J. Lienig, "Please, Fold the Line: Designing Flexible Electronics Using Open-Source Software," in *Proceedings of the 6th IEEE International Flexible Electronics Technology Conference (IFETC 2024)*, Bologna, Italien, S. 15–18, September 2024.
doi: [10.1109/IFETC61155.2024.10771875](https://doi.org/10.1109/IFETC61155.2024.10771875)
- N. Arnold, "Integrated design process for flexible electronics using VMAP," Vortrag, 1st VMAP User Meeting, Schloss St. Augustin, Birlinghoven, Germany, 14.-15. Februar 2024.
<https://www.vmap-standard.org/Presentations-VMAP-in-RD-Projects/>
- N. Arnold, "Entwurf und Simulation von flexiblen Systemen mit Open-Source-Software," Vortrag, VDE/VDI EMS-Slam, online, Nov. 23, 2023.
- N. Arnold, "Neue Aufbau- und Verbindungstechnik für flexible Elektronik," Vortrag, Layout-Fachgruppentreffen: Advanced Packaging – Technologien und Entwurf, Dresden, Germany, Sep. 25, 2023.
- N. Arnold, "Neue Aufbau- und Verbindungstechnik für zuverlässige biegbare Elektronik," Vortrag, 258. IFTE-Institutskolloquium, Dresden, Germany, Apr. 21, 2023.

B) Geplante Aktivitäten:

Auf der Internetseite werden die Ergebnisse aus dem Projekt in Kurzform dargestellt. Außerdem wird das Projekt im Jahresbericht des Instituts aufgenommen und damit einen breiten Kreis von Fachleuten, Firmen und anderen Forschungseinrichtungen zugänglich gemacht. dargestellt. Des Weiteren werden innerhalb von Arbeitskreisen Experten über die neuen Möglichkeiten des Entwurfs sowie des Nutzens von flexibler Elektronik informiert. Ins Auge gefasst werden dabei Workshops von VDE und von Silicon Saxony.