

# DIE ZEHN MYTHEN DER NUMERISCHEN STRÖMUNGSSIMULATION

DRES. IVO WEINHOLD UND JOHN PARRY,  
MENTOR GRAPHICS, MECHANICAL ANALYSIS DIVISION



M E C H A N I S C H E A N A L Y S E

W H I T E P A P E R

[www.mentor.com](http://www.mentor.com)

## WIE AUS FÜNF MYTHEN ZEHN WURDEN

### EINLEITUNG

Vor zirka fünf Jahren sahen wir uns veranlasst, unser Whitepaper „Die fünf Mythen der numerischen Strömungssimulation“ zu schreiben [1]. Seitdem erhielten wir umfangreiches Feedback zu unseren Ansichten. Unser Bemühen, mit diesen Mythen aufzuräumen, stieß weitgehend auf große Resonanz. Durch das Feedback und die Gespräche zu diesem Thema wurde uns klar, dass die Situation komplexer ist als wir anfänglich dachten. Nachdem wir die Situation eine Zeitlang von allen Seiten betrachtet hatten, hielten wir es für erforderlich, einen Nachtrag zu „Die fünf Mythen...“ zu verfassen. Darin geben wir eine kurze Zusammenfassung der ursprünglichen Mythen, stellen vier neue, verwandte Mythen vor und fügen einen komplett neuen Mythos hinzu.

### ZUSAMMENFASSUNG „DIE FÜNF MYTHEN DER NUMERISCHEN STRÖMUNGSSIMULATION“

Seit wir „Die fünf Mythen...“ geschrieben haben, hat sich einiges auf dem Markt der numerischen Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics = CFD) getan. Bevor wir also diese Mythen zusammenfassen, möchten wir das Thema dieses Whitepaper eingrenzen. Unsere Ausführungen beziehen sich speziell auf den größten Bereich des CFD-Markts: Universelle CFD-Software, die Lösungen für Navier-Stokes-Gleichungen liefert. So genannte netzlose Ansätze, bei denen Lattice-Boltzmann-Methoden zum Einsatz kommen, sowie anwendungsspezifische CFD-Software wie beispielsweise Tools für Spritzgieß-, Elektronik Kühlungs- oder Rechenzentrumssimulationen, deren speziell angepasste Funktionalität Kunden ein anderes Nutzenversprechen liefert, werden von uns ausdrücklich in diesem Dokument nicht behandelt. Hier also die Zusammenfassung:

## MYTHOS 1: DER EINSATZ VON CFD IM KONSTRUKTIONSPROZESS IST ZU SCHWIERIG

Der Ursprung dieses Mythos liegt in der Vergangenheit. Ähnlich wie bei den FEA-Codes vor etlichen Jahren war die Arbeit mit den CFD-Codes der 1980er und 1990er Jahre relativ kompliziert. Zweckmäßige Vernetzung, Auswahl der numerischen Löser, Turbulenzmodellierung, Erzielung und Beurteilung der Lösungskonvergenz, Gewährleistung der Ergebnissenauigkeit und die richtige Interpretation der Ergebnisse war damals ausschließlich Spezialisten vorbehalten. Heutzutage benötigen Konstruktionsingenieure weit weniger Fähigkeiten, um die CFD-Software zu bedienen. Sie müssen lediglich mit dem CAD-System und den physikalischen Eigenschaften des Produkts vertraut sein – also alles Fähigkeiten, die der Großteil der Konstruktions- und Entwicklungsingenieure bereits besitzt.

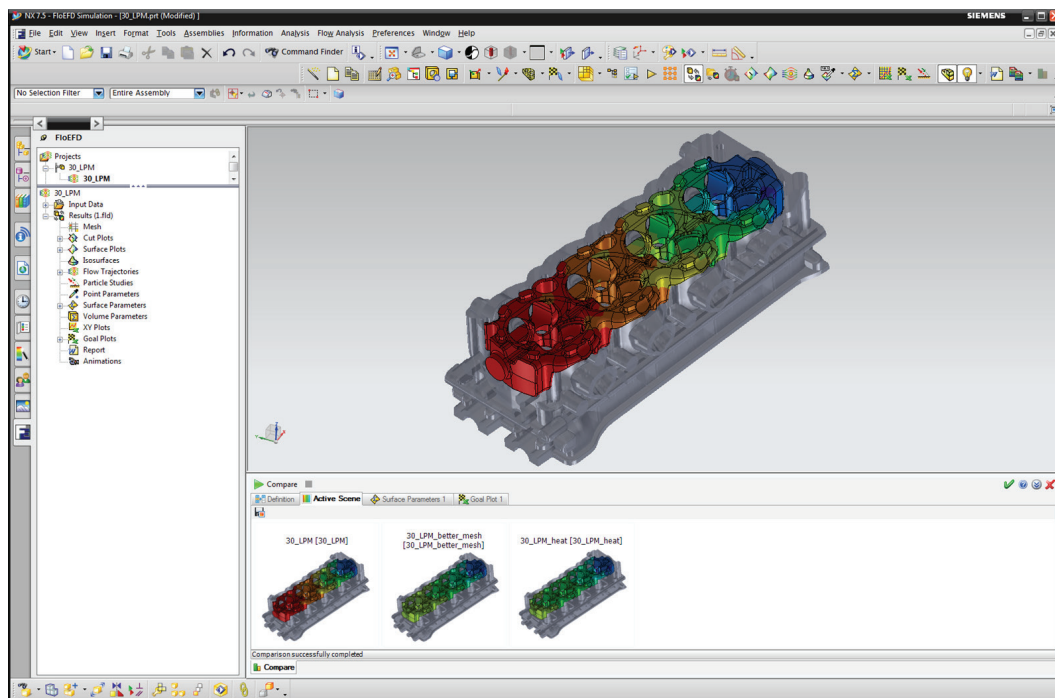


Abbildung 1: CAD-integriertes CFD-Paket FloEFD für Siemens NX.

Dies hat einen einfachen Grund: Automatisierung und Benutzerfreundlichkeit der Tools sind inzwischen sehr weit fortgeschritten [2]. Allerdings wird die Bedeutung der Benutzerfreundlichkeit größtenteils missverstanden. Und darin haben wir einen neuen Mythos entdeckt: Mythos 6 – Die Benutzerfreundlichkeit ist keine Voraussetzung für einen zuverlässigen und reproduzierbaren Workflow.

## MYTHOS 2: DER EINSATZ VON CFD IM KONSTRUKTIONSPROZESS DAUERT ZU LANGE

Der größte Zeitfaktor bei CFD-Simulationen war bisher der Prozess der Vernetzung, da eine erhebliche Anzahl manueller Eingriffe erforderlich war, um eine akzeptable Netzqualität zu erreichen. Dazu mussten Lücken und Überlappungen entfernt, Verzerrungen, Seitenverhältnisse und Verzug von Zellen korrigiert und das Volumen einzelner Zellen (Größenverhältnis einer Zelle zu benachbarten Zellen, kleinste Zellgröße und Netzverteilung) angepasst werden. Da sich die Geometrie während des Entwicklungsprozesses laufend ändert, musste dieser halbmanuelle Prozess für jede Konstruktionsiteration erneut ausgeführt werden. Alle diese Arbeitsschritte lassen sich inzwischen vollständig automatisieren. Native 3D-CAD-Daten werden direkt für Strömungssimulationen übernommen, ohne dass Konvertierungen oder Kopien erforderlich sind. Neue Komponenten und Features, die das Ergebnis von Konstruktionsänderungen sind, lassen sich innerhalb weniger Minuten vernetzen. Der für die Analyse benötigte Zeitaufwand wird auf diese Weise erheblich reduziert.

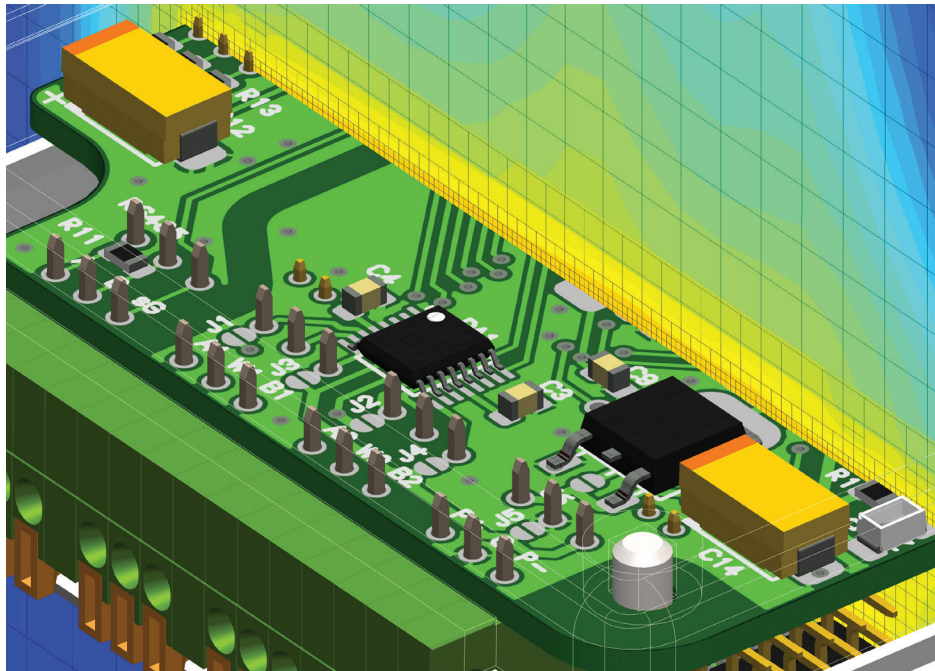


Abbildung 2: Effiziente thermische Simulation eines Elektronikgehäuses.

Die Akzeptanz dieses Verfahrens hat jedoch einen weiteren Mythos hervorgebracht: Mythos 7 – Der Einsatz von CFD im Konstruktionsprozess geht stets mit Abstrichen bei der Ergebnisgenauigkeit einher.

## MYTHOS 3: CFD IST ZU TEUER, UM VON KONSTRUKTEUREN EINGESETZT ZU WERDEN

In unserem ursprünglichen Whitepaper stellten wir noch fest, dass die Kosten für traditionelle CFD-Software zirka 25.000 USD pro Jahr an Lizenzgebühren betragen. Die neueste Generation der CFD-Software, die für den allgemeinen Einsatz während des Entwicklungsprozesses vorgesehen ist, kostet zirka 25.000 USD für eine unbefristete Lizenz. Als einzige laufenden Kosten fällt eine Wartungsgebühr in der Größenordnung von 18% (4.500 USD) pro Jahr an. Eine weitere Reduzierung der Gesamtbetriebskosten resultiert zudem daraus, dass sich ein Ingenieur mit nur minimalem Schulungsaufwand in die CFD-Software einarbeiten kann.<sup>1</sup> Neue Technologien, wie z. B. die Immersed-Boundary-Methode für die Simulation von Reibung und Wärmeübertragung zwischen Fluid und Festkörperoberfläche, senken die Anzahl der für genaue Ergebnisse benötigten Netzzellen um ein Vielfaches. Dies wiederum ermöglicht ein produktives Arbeiten auf PCs und Laptops mit Mehrkern- Prozessoren, was die Kosten weiter reduziert.

<sup>1</sup> Dies bezieht sich auf Schulungen zur Bedienung des Tools. Vorausgesetzt werden Kenntnisse der Fluidströmung und Wärmeübertragung für die entsprechende Anwendung, jedoch keine detaillierten Kenntnisse auf dem Gebiet der numerischen Strömungssimulation.

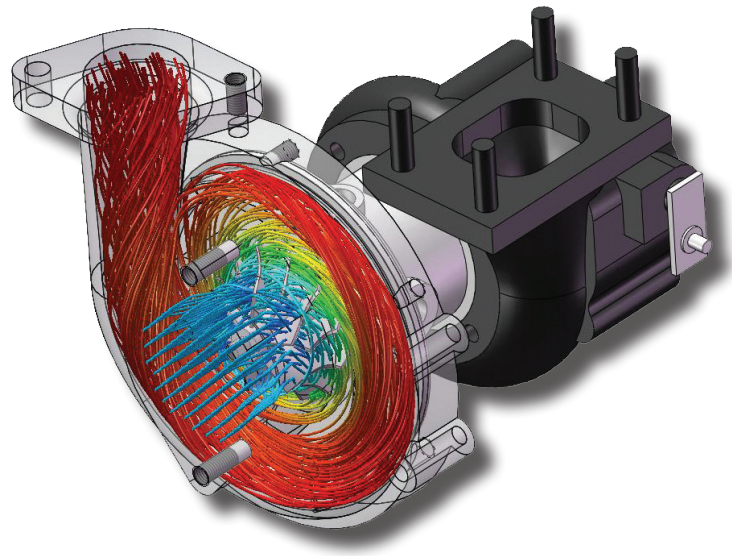


Abbildung 3: Kosteneffiziente CFD – Simulation eines Turboladers für Fahrzeuge.

Dieser Mythos erwies sich als relativ unstrittig, allerdings steht er mit einem dritten neuen Mythos in Zusammenhang: Mythos 8 – Für die Erzielung genauer Ergebnisse der CFD-Simulation werden Spezialisten benötigt.

**MYTHOS 4: DAS CAD -MODELL KANN NICHT DIREKT FÜR DIE CFD -ANALYSE VERWENDET WERDEN**

In der Vergangenheit musste das CAD-Modell zunächst in ein anderes Programm kopiert oder konvertiert und anschließend erheblich modifiziert werden, um das CFD-Modell zu erzeugen. Daher sahen es viele Konstruktionsingenieure für zuverlässiger und weniger aufwendig an, die Geometrie innerhalb des CFD-Programms von Grund auf neu zu erstellen, und dies, obwohl sie dafür sehr viel Zeit investieren mussten und auf diese Weise eine zusätzliche erhebliche Fehlerquelle entstand.

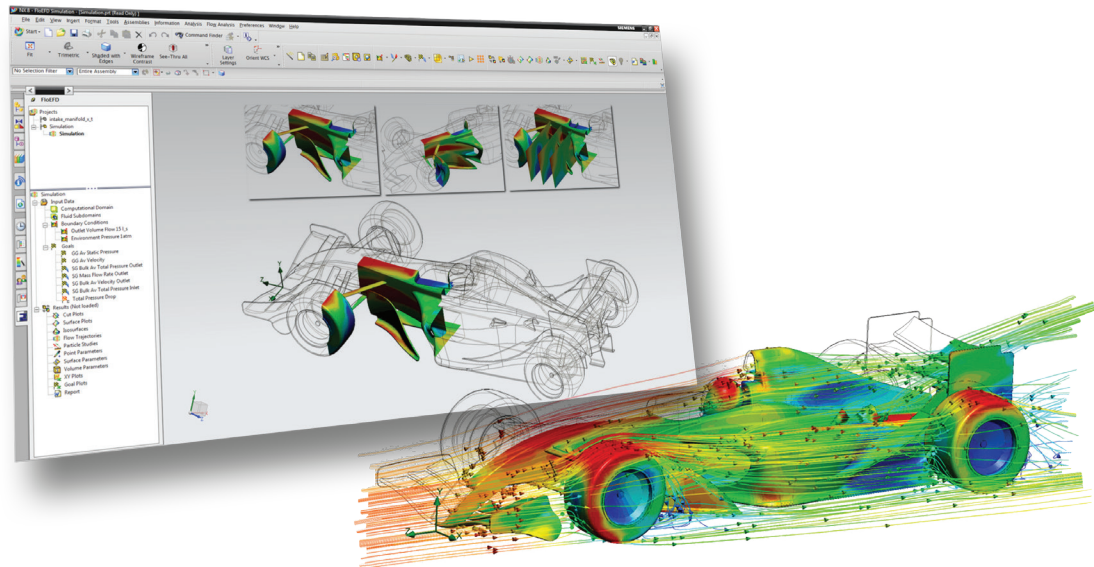


Abbildung 4: Direkte Nutzung von nativer CAD-Geometrie für CFD-Simulationen.



Heutzutage können 3D-CAD-Daten direkt für Strömungssimulationen verwendet werden, ohne dass Konvertierungen oder Kopien erforderlich sind. Auch müssen keine Phantom-„Objekte“ im Feature-Baum erstellt werden, um die Strömungsräume abzubilden. Der Mythos, dass CAD-Geometrie nicht direkt für die Analyse verwendet werden kann, hat sich bis heute – in etwas abgewandelter Form – gehalten. Dies bescherte uns unseren vierten neuen Mythos: Mythos 9 – Fertigungsorientierte CAD-Modelle sind zu komplex, um zur Analyse herangezogen zu werden.

#### MYTHOS 5: FÜR DIE MEISTEN PRODUKTE IST KEINE CFD-ANALYSE ERFORDERLICH

Dieser Mythos gehört unserer Einschätzung nach weitgehend der Vergangenheit an. CFD wird heutzutage eingesetzt, um die Qualität von Produkten aus den unterschiedlichsten Bereichen zu optimieren, wie z. B. Swimmingpools, Toiletten, Händetrockner, Rasensprenger, Gaszähler, Druckmaschinen, Festplatten und Ölfilter, um nur einige Anwendungen zu nennen. Obwohl diese Entwicklung noch nicht abgeschlossen ist, hat die Demokratisierung von CFD für den Einsatz in der Produktentwicklung dazu geführt, dass CFD inzwischen Einzug in Universitätsseminare und amerikanische High-School-Programme gehalten hat [3, 4].

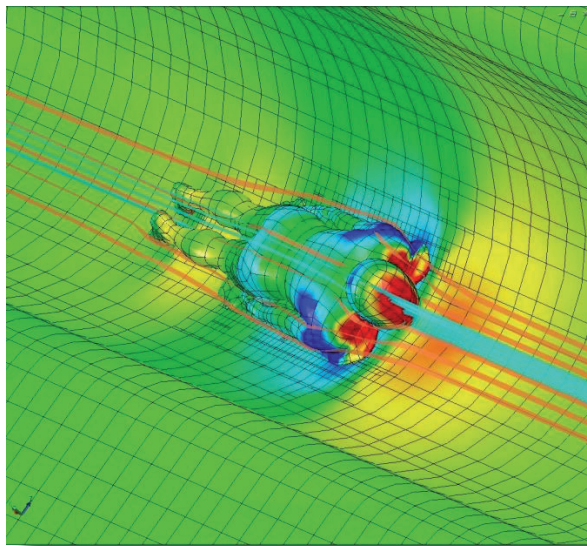


Abbildung 5: CFD-Simulation einer Skeletonschlittenfahrt zur Optimierung der Schlittenkonstruktion (Bromley Technologies).

An dieser Stelle möchten wir die neuen – oder zumindest neu identifizierten – Mythen der CFD vorstellen, auf die wir gestoßen sind.

#### FÜNF NEUE MYTHEN DER NUMERISCHEN STRÖMUNGSSIMULATION

##### MYTHOS 6: BENUTZERFREUNDLICHKEIT IST KEINE VORAUSSETZUNG FÜR EINEN ZUVERLÄSSIGEN UND REPRODUZIERBAREN WORKFLOW

Vielleicht war es ein Versäumnis, dass wir das letzte Mal nicht auf diesen Mythos eingegangen sind. Doch die Hartnäckigkeit, mit der sich dieser Mythos über einen so langen Zeitraum gehalten hat, brachte ein wenig Klarheit. In der Tat scheint es eine Denkrichtung zu geben, die besagt, dass die Verwendung von CFD schwierig sein sollte (vielleicht, um den einen oder anderen Anwender zu beruhigen).

Ein hohes Maß an Benutzerfreundlichkeit reduziert die geistige Anstrengung bei der Bedienung des Tools. Dies wiederum führt zu weniger Fehlern, reibungsloseren Workflows, höherer Effizienz, stärkerer Motivation, mehr Engagement und letztlich zu zufriedeneren Konstrukteuren und Ingenieuren. Die Benutzerfreundlichkeit beeinträchtigt Spezialisten nicht bei ihrer Arbeit, sondern unterstützt sowohl Spezialisten als auch weniger spezialisierte Anwender. Dadurch hängen Qualität und Zuverlässigkeit weniger von der Leistung einzelner Nutzer ab.

Benutzerfreundlichkeit ist eine Voraussetzung für zuverlässige, reproduzierbare CFD-Ergebnisse in hoher Qualität, da Fehler aus einer Vielzahl von Quellen stammen und sehr leicht passieren können. Fehler sind nahezu unvermeidlich, wenn Ingenieure Hunderte – wenn nicht Tausende – von separaten Arbeitsvorgängen ausführen müssen, um ein CFD-Modell aus ersten Entwürfen zu generieren. Dies beginnt mit dem Importieren der exportierten CAD-Geometrie, bei der zahlreiche Entscheidungen darüber getroffen werden müssen, wie sich die Geometrie während des Importvorgangs korrigieren und/oder vereinfachen lässt. Indem mehrere Arbeitsvorgänge zu wenigen Vorgängen auf höherer Ebene zusammengefasst werden, steht dem Anwender eine wesentlich geringere Anzahl von variablen Auswahlmöglichkeiten zur Verfügung. Dies vereinfacht sowohl die Definition als auch die Umsetzung von Best-Practice-Richtlinien.

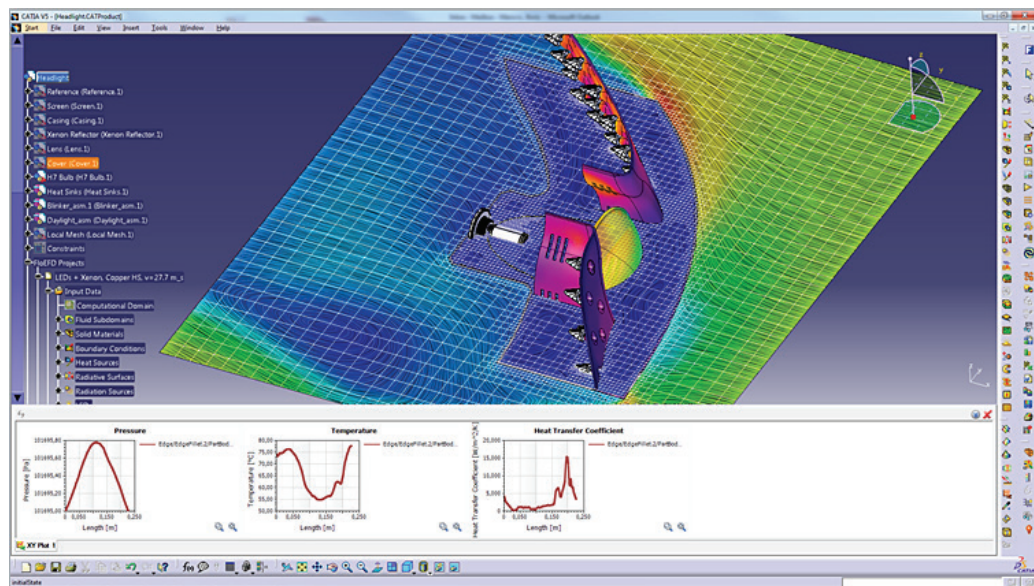


Abbildung 6: Benutzerfreundlichkeit von CAD-integrierter CFD-Software:  
In CATIA V5 angezeigte Liniendiagramme.

Wenn die Benutzerfreundlichkeit in den Vordergrund gerückt wird, reduziert sich die Anzahl der möglichen Pfade durch die Software. Dadurch lassen sich neue Funktionen leichter testen und es kann einfacher festgestellt werden, wie sie mit bereits vorhandener Funktionalität zusammenarbeiten. Betrachtet man das Ganze aus Sicht der Softwareentwicklung, so bedeutet eine größere Anzahl möglicher Kombinationen von in der Software auswählbaren Einstellungen für den Anbieter, dass es für ihn schwieriger, zeitaufwendiger und auch kostspieliger ist, die Software zu testen. Natürlich werden diese Kosten an die Kunden weitergegeben. Wenn neue Funktionen hinzukommen, nimmt die Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten explosionsartig zu. Damit wird es äußerst schwierig oder nahezu unmöglich, eine vollständige Testabdeckung des Codes zu erreichen. Das bedeutet, dass Upgrades auf neue Versionen für Kunden gewisse Risiken bergen, da sie langwierige Abnahmetests durchführen müssen, bevor sie ihr System auf eine neue Version umstellen. Dies wiederum hat zur Folge, dass sich die Gesamtbetriebskosten weiter erhöhen. Die in Mythos 3 beschriebenen Kosten sind daher in Wirklichkeit nur die Spitze des Eisbergs.

## MYTHOS 7: DER EINSATZ VON CFD IM KONSTRUKTIONSPROZESS GEHT STETS MIT ABSTRICHEN BEI DER ERGEBNISGENAUIGKEIT EINHER

Dies erscheint logisch, folgt man der Überlegung, dass sich Genauigkeit und Schnelligkeit gegenseitig ausschließen. Dieser Mythos geht aus Mythos 2 hervor, da angenommen wurde, dass es für die „richtige Lösung“ zu lange dauert, um mit den Konstruktionsänderungen Schritt zu halten. Für ein besseres Verständnis dieses Mythos müssen wir kurz auf die technologische Entwicklung von CFD eingehen.

Bei konventionellen CFD-Programmen wird versucht, alle Berechnungen auf dem Volumennetz durchzuführen. Doch dies war nicht immer so: Die begrenzte Rechenleistung, die noch vor etlichen Jahren zur Verfügung stand, bedeutete, dass Wandfunktionen die einzige Möglichkeit waren, um den Einfluss der Grenzschicht zwischen der Festkörperoberfläche und der Kernströmung abzubilden. Diese Wandfunktionen wurden ursprünglich nur in den wandnahen Zellen angewendet. Die Auflösung der Grenzschicht mithilfe der Vernetzung war unerschwinglich teuer. Außerdem lag die Ergebnisqualität, die auf einem anpassbaren Netz für alle außer den einfachsten Situationen erzielt werden konnte, weit hinter der Qualität zurück, die sich mithilfe empirischer Wandfunktionen erreichen ließ, da diese weiter verfeinert werden konnten, um die Oberflächenrauigkeit einzubeziehen [5].

Dank der Fortschritte bei der Rechenleistung konnten auch die Volumennetze immer weiter verfeinert werden, um die Ergebnisqualität zu verbessern. Mit dem Aufkommen einer strukturierten, körperangepassten Vernetzung in den 1980ern wurde es möglich, den ursprünglichen kartesischen Ansatz für CFD mithilfe der umlaufenden Vernetzung direkt auf 2D-Tragflächen anzuwenden.

Diese Netze waren stark orthogonal.<sup>2</sup> Als dieser Ansatz mithilfe unstrukturierter Netze in 3D auf unregelmäßig geformte Objekte übertragen wurde, bedeutete die Nichtorthogonalität des Netzes, dass die Ermittlung flächenbasierter Flüsse, die für die Lösung der Massen-, Wärme- und Impulsbilanz für jede Zelle benötigt wurden, bei Weitem komplexer und auch kritischer war. Zudem wurden dazu erhebliche mathematische Näherungen benötigt [6].

Geringfügige Abweichungen zwischen der physikalischen Realität und dem Simulationsergebnis für eine Netzzelle wurden durch Konvektion und Diffusion auf die benachbarten Zellen als natürlicher Bestandteil der Lösung übertragen. Die Akkumulation innerhalb des gesamten Netzes wirkte sich nachteilig auf die Lösungsgenauigkeit aus. Außerdem war es sehr viel schwieriger, Lösungskonvergenz zu erzielen. Diese Schwankung bei der Netzqualität führte dazu, dass die physikalischen Einflüsse geringfügiger geometrischer Abweichungen verdeckt wurden. Unter diesem Problem leidet konventionelles, auf körperangepassten Netzen basierendes CFD bis heute.

Die Branche hat sich dieser Herausforderung gestellt und zahlreiche Lösungen entwickelt: Dank Verbesserungen bei der Rechenleistung können immer feinere Netze generiert werden. Durch diese Verfeinerung ist es möglich, dass Abweichungen bei Größe und Form von einer Netzzelle zur benachbarten Zelle reduziert werden können. Die Orthogonalität wird auf diese Weise verbessert. Weiterhin wird intensiv daran gearbeitet, die Entwicklung von automatisierten<sup>3</sup> Netzgeneratoren voranzutreiben, die Kombinationen aus Hexaedern, Tetraedern und Prismen ermöglichen. In jüngster Zeit wurden vielflächige Zellformen, die bessere orthogonale Eigenschaften für jede beliebige Strömungsrichtung aufweisen<sup>4</sup>, entwickelt, z. B. durch die Zusammenfassung von Tetraedern. Zudem wurden komplexere numerische Verfahren zur verbesserten Abschätzung der Kopplung des Flusses über Zellflächen und des Drucks entwickelt.

<sup>2</sup> Das bedeutet, dass eine Linie, die die Zellmittelpunkte verbindet, senkrecht zur Zellfläche verläuft. Die Berechnung von Flüssen durch Zellflächen für Masse und Impuls sind daher lediglich das Skalarprodukt des Bereichs, der Geschwindigkeit und der Fluidichte stromaufwärts.

<sup>3</sup> Das bedeutet lediglich, dass das Netz mithilfe eines Algorithmus erzeugt wird, nicht jedoch dass dieser Vorgang vollständig automatisiert ist.

<sup>4</sup> Wichtig für eine Large Eddy Simulation (LES), bei der Wirbel dazu führen, dass die lokale Strömungsrichtung im Laufe der Zeit fluktuiert.



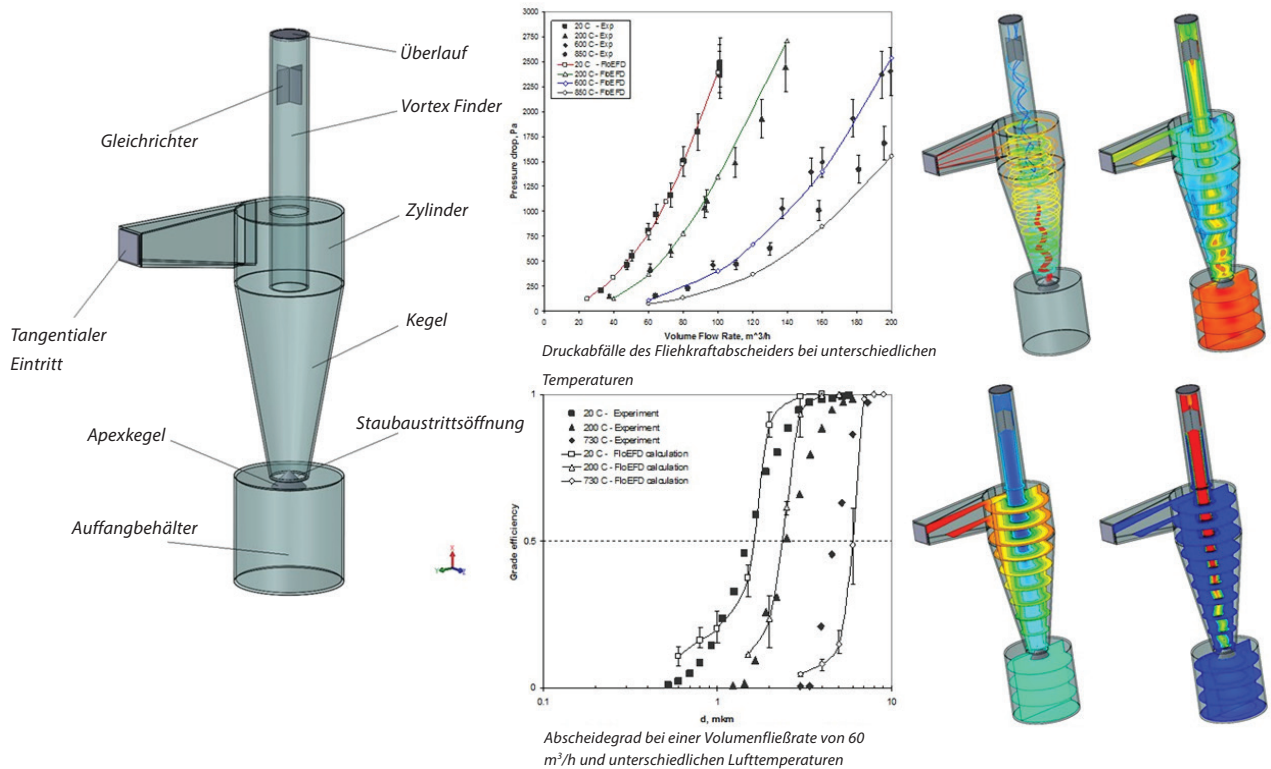


Abbildung 7: Validierung einer Zyklonabscheider-Simulation für die Ermittlung von Druckabfall und Abscheidegrad.

Mit Ausnahme von Fällen, in denen es auf höchste Präzision ankommt, kann in allen anderen Fällen eine hohe Genauigkeit mithilfe konventioneller Turbulenzmodelle mit einer Immersed-Boundary-Methode für Wandreibung und Wärmeübertragung erzielt werden [7]. Dieser Ansatz ist zirka 100 Mal kostengünstiger als konventionelle körperbasierte CFD-Methoden, die auf RANS-Gleichungen basieren, liefert jedoch dieselbe – oder sogar eine höhere – Ergebnissenauigkeit [8]. Damit lässt sich vielleicht auch erklären, warum Immersed-Boundary- Software, die auf dem kartesischen Koordinatensystem basiert, in den letzten Jahren immer beliebter wurde und eine Reihe neuer Marktteilnehmer hervorgebracht hat [9]. Die Einbettung dieser Technologie in CAD- Systeme steigert den Nutzen für Ingenieure und hat dank der vollständigen Integration des CAD-Systems in das PLM-System den zusätzlichen Vorteil, dass die Datenverwaltung erheblich vereinfacht wird. CAD-integriert => PLM-integriert.

Wie bereits erwähnt, kann es bei Verwendung traditioneller CFD-Tools sehr lange dauern und eine Vielzahl manueller Tätigkeiten erfordern, um das Netz so zu erstellen und zu optimieren, dass man eine für brauchbare und genaue Simulationsergebnisse ausreichend hohe Netzqualität und -dichte erhält

Im Gegensatz dazu verfügt die neue Generation der CFD-Software über Kerntechnologien, mit denen hochqualitative Ergebnisse in kürzester Zeit erzielt werden können. Innerhalb weniger Minuten lässt sich ein kartesisches Octree-Netz erstellen, das sich automatisch an Festkörper-Festkörper- und Festkörper-Fluid-Grenzen verfeinert. Dabei ist es nicht mehr erforderlich, separate Oberflächen- und Volumennetze zu generieren. Konstruktionsingenieure können die Netzdicke mit einem einzigen Schieberegler kontrollieren, was die Handhabung enorm vereinfacht.

Aufgrund der Tatsache, dass das Netz auf dem kartesischen System basiert, besitzt es die höchstmögliche numerische Netzqualität, da die Zellen in kartesischen Netzen perfekt orthogonal sind [6, 10]. Folglich ist es auch nicht möglich, die geometrische Netzqualität durch manuelle Eingriffe zu verbessern. Diese einzigartige Benutzerfreundlichkeit führt zu einer deutlichen Verbesserung der Ergebnissenauigkeit, da die Qualität der CFD-Simulation nicht mehr durch enge Zeitvorgaben für ein Projekt eingeschränkt werden muss. In einem industriellen Umfeld haben Ingenieure, die mit konventioneller CFD arbeiten, keine Zeit für die Verfeinerung von  $y^+$ -Werten im gesamten Modell, selbst wenn die Geometrie relativ einfach ist. Je komplexer die Geometrie ist, umso größere Vorteile werden mit der kartesischen Octree-Vernetzung erzielt. Kartesische Octree-Netze eignen sich hervorragend für die adaptive Netzverfeinerung, bei der sich das Netz selbstständig bei fortschreitender Lösung verfeinert, um sicherzustellen, dass Gradienten angemessen erfasst werden, beispielsweise bei der Simulation von Druckstößen.

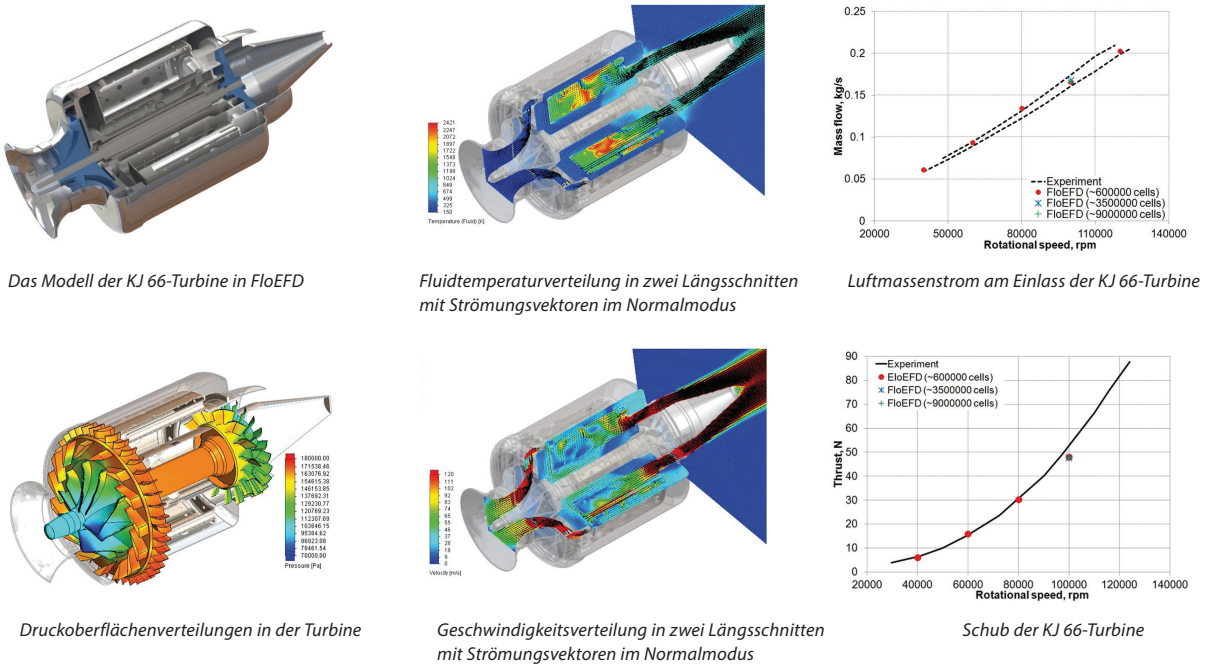


Abbildung 8: Validierung einer Simulation eines Mikro-Turbinenmotors, die mit FloEFD durchgeführt wurde.

### MYTHOS 8: FÜR DIE ERZIELUNG GENAUER CFD -SIMULATIONSERGEBNISSE WERDEN SPEZIALISTEN BENÖTIGT

Dieser Mythos gilt weiterhin teilweise für konventionelle CFD und trägt dazu bei, dass sich Mythos 1 in einem breiten Querschnitt der CFD-Community hält, da für die Aneignung und Aufrechterhaltung einer hohen Kompetenz eine Vollzeit-Nutzung des CFD-Tools notwendig ist. Interessant ist, dass zwei beliebige Spezialisten immer5 ein unterschiedliches Simulationsergebnis für ein realitätsnahes komplexes industrielles Problem erzielen werden. In der Regel sind sie unterschiedlicher Meinung darüber, wessen Ergebnis das Beste ist. Dies entkräftet den letzten Punkt in der Argumentation für die Einbeziehung von spezialisierten Analysten – dass sie benötigt werden, um die von Nicht-Spezialisten produzierten Ergebnisse zu überprüfen.

Durch die Optimierung der Benutzerfreundlichkeit wird weniger simulationsspezifisches Fachwissen benötigt. Ingenieure können sich daher stärker auf das technische Problem konzentrieren. Das numerische und physikalische Modellierungs-Know-how des Softwareentwicklers steht dem Konstrukteur über die Automatisierung zur Verfügung, die in dem jeweiligen Tool bereitgestellt wird. Eingaben sind auf Informationen beschränkt, die für das Problem, das beschrieben wird, notwendig sind: Randbedingungen, Materialien und weitere Details, die direkt auf die native 3D-Geometrie innerhalb des CAD-Systems angewendet werden. Auf diese Weise können auch Anwender, die keine Simulationsspezialisten sind, zuverlässige und reproduzierbare Simulationsergebnisse in hoher Qualität erzielen.

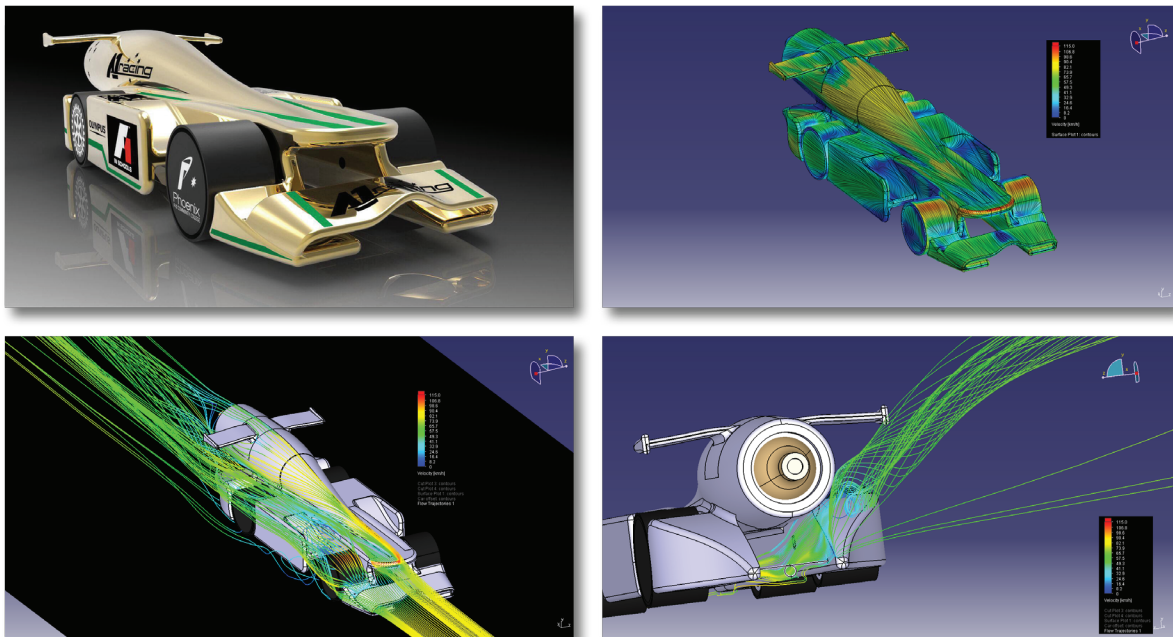


Abbildung 9: Schüler verwendeten FloEFD für den „F1 in Schools“-Wettbewerb.

Wie bereits oben in der Fußnote erwähnt, sind ein entsprechender Ingenieurshintergrund und eine gewisse Fachkompetenz erforderlich, um die Anwendung zu verstehen, für die eine Lösung geliefert werden soll, damit die Simulationsergebnisse zur Verbesserung der Produkteigenschaften genutzt werden können. Allerdings ist dank der automatisierten Optimierung bereits ein geringeres Maß an Fachkompetenz erforderlich, um Produktverbesserungen umzusetzen. CAD-integrierte CFD stellt Funktionalitäten sowohl für Parameterstudien als auch für den Ergebnisvergleich bereit. Konstruktive Verbesserungen lassen sich damit problemlos untersuchen.

<sup>5</sup> Dabei handelt es sich eher um ein Axiom als eine Tatsache, da bisher keine zwei Spezialisten exakt dasselbe Simulationsergebnis für ein reales technisches Problem erzielt haben.

Es liegt uns fern, den Wert von Analyseexperten zu schmälern. Diese Fachleute sind der eigentliche Grund, warum CFD zu dem geworden ist, was es heute ist. Sie waren die Wegbereiter für neue Anwendungen, die die Entwicklung neuer physikalischer und numerischer Modelle sowie weiterer Innovationen vorangetrieben haben. In einer späten Entwicklungsphase, wenn die Geometrie stabil ist, kann konventionelle CFD eingesetzt werden. Dazu können analysefähige CAD-Daten genutzt werden, die bereits mithilfe einer CAD-integrierten CFD-Lösung weiterentwickelt wurden, um bei Bedarf eine weitere Verifizierung der Konstruktion zu ermöglichen. Alternativ dazu können Analyseexperten selbst auf CAD-integrierte CFD während des Entwicklungsprozesses zurückgreifen. CAD-integrierte CFD und konventionelle CFD können – und sollten – sich ergänzen. CAD-integrierte CFD lässt sich zudem hervorragend mit anderen CAE-Tools integrieren, die im Produktentwicklungsprozess verwendet werden. Dies ermöglicht beispielsweise den Export von Temperaturdaten als thermische Last, um unter anderem in Creo Simulation- sowie NASTRAN-basierten FEA-Solvern genutzt zu werden. Auf diese Weise lassen sich weitere Aspekte der Konstruktion beschleunigen.

#### MYTHOS 9: FERTIGUNGSORIENTIERTE CAD-MODELLE SIND ZU KOMPLEX, UM ZUR ANALYSE HERANGEZOGEN ZU WERDEN

Bei der Arbeit mit exportierter CAD-Geometrie hängt deren Eignung für die Analyse von mehreren Kriterien ab: wie das ursprüngliche CAD-Modell erstellt wurde, der Qualität des Konvertierungsprogramms, mit dem die Geometrie in ein neutrales Dateiformat konvertiert wurde, dem ausgewählten neutralen Dateiformat und wie gut die CAD-Importfunktion des Zielanalysetools den Import dieses speziellen Formats verarbeitet. Allerdings gibt es bei diesem Verfahren einen Nachteil: Sobald die CAD-Baugruppe exportiert wurde, gehen die meisten oder sogar alle Parameter- und Verlaufsinformationen (d. h. die Entstehungshistorie, die dokumentiert, wie die Baugruppe, die Komponenten und ihre Features konstruiert wurden) verloren. Das bedeutet, dass damit auch die Möglichkeit, Konstruktionsfehler schnell und einfach aufzudecken und zu beheben, massiv beeinträchtigt wird. An diesem Punkt ist die Vereinfachung und Rekonstruktion von Komponenten der Baugruppe die einzige Option, was jedoch zu Fehlern führen kann.

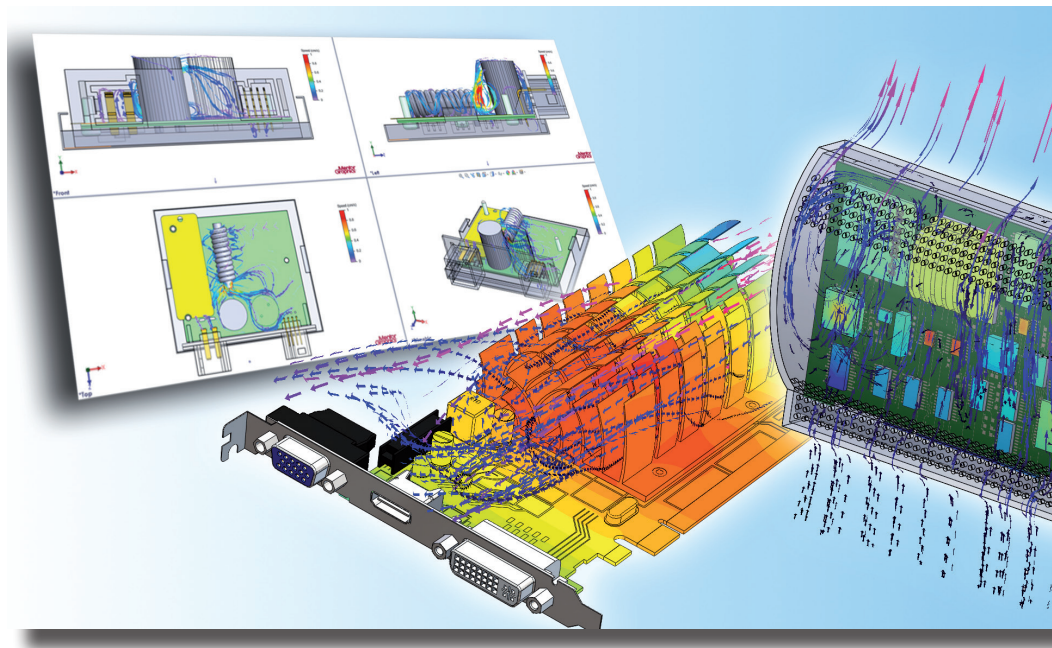


Abbildung 10: In CFD-Simulationen verwendete komplexe 3D-Geometrie.



Ganz anders verhält es sich, wenn innerhalb des MCAD-Systems mit nativen CAD-Daten gearbeitet wird. Fehler können einmal erkannt und müssen auch nur einmal behoben werden. Dies geschieht relativ einfach direkt im Haupt-Konstruktions-Workflow, sodass die Analysegeometrie und die Konstruktionsgeometrie stets synchron sind.

CAD-integrierte CFD-Tools, die auf kartesischen Netzen basieren, sind auch recht tolerant im Hinblick auf CAD-Fehler, da für den Analyseprozess kein Oberflächennetz benötigt wird. Hinzu kommt, dass unwichtige Features innerhalb des CAD-Modells, die keine Bedeutung für die CFD-Analyse haben, vernachlässigt werden können, indem für ihre Lösung kein ausreichend feinmaschiges lokales Netz verwendet wird. Hingegen können kleinere Features wie Verbindungsstellen und kleine Lücken aufgelöst werden, um ihren Einfluss auf die Strömungsleistung des Systems zu untersuchen. In CFD haben kleine Features oftmals eine spürbare Auswirkung auf die Strömungsverhältnisse in der Grenzschicht, beispielsweise indem sie dazu führen, dass eine Ablösung der Strömung erfolgt. Eine Vereinfachung der Geometrie ist nicht erforderlich, sie wird aber auch nicht verhindert. Es ist relativ einfach, die Geometrie für eine effiziente und gleichzeitig genaue Analyse vorzubereiten, indem Komponenten und Features mithilfe des Feature-Baums gesteuert und/oder die Vereinfachungsfunktionen des CAD-Systems genutzt werden.

#### MYTHOS 10: CAD -INTEGRIERTE CFD -TOOLS SIND TECHNISCH WENIGER HOCHENT WICKELT

Dieser Mythos stützt sich auf die Annahme, dass es nicht möglich ist, viele der hochentwickelteren Funktionen, die konventionelle CFD bereitstellt, zu automatisieren, und daher CFD-Tools, die mit einem hohen Automatisierungsgrad arbeiten, zahlreiche Funktionalitäten ausschließen müssen. Der Ursprung dieses Mythos ist unbekannt. Möglicherweise entstand er aufgrund von Erfahrungen, die Simulationsexperten in der Vergangenheit bei der Arbeit mit „abgespeckten“ Versionen traditioneller CFD-Tools, die für den Einsatz zusammen mit einem bestimmten CAD-Tool vermarktet wurden, gemacht haben. Oder er entstammt den Erfahrungen von Konstrukteuren, die bereits mit Upfront-CFD-Tools gearbeitet haben, in denen jedoch auch die körperbasierte Vernetzung eingesetzt wurde. Aber vielleicht hat auch eine Kombination dieser beiden Faktoren zur Entstehung des Mythos beigetragen.

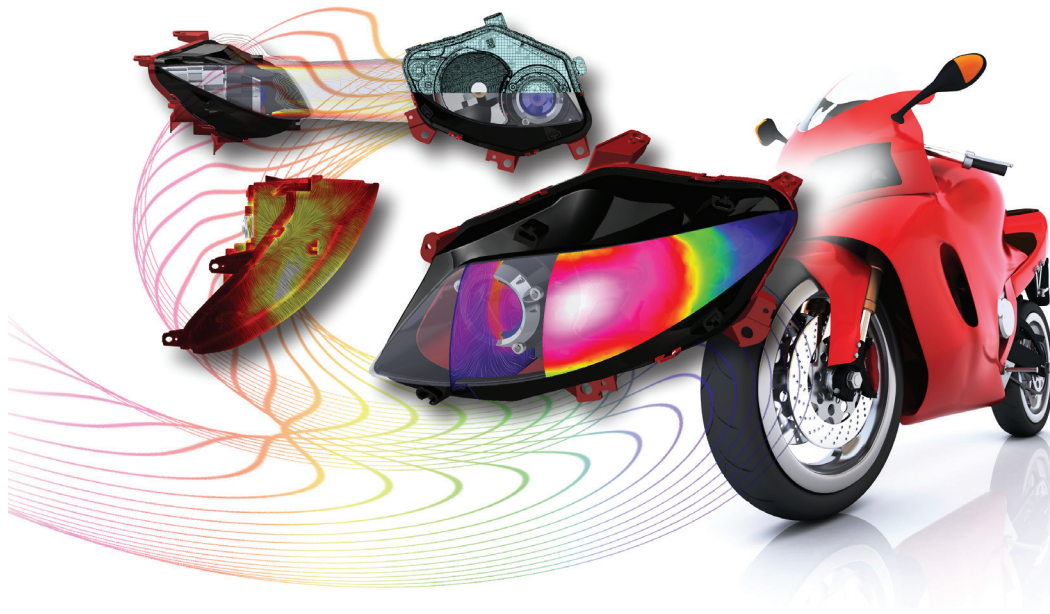


Abbildung 11: CAD-integrierte CFD-Software verwendet komplexe physikalische Modelle zur Berechnung des Wärmeverhaltens eines Motorradescheinwerfers.



Trotz der Einfachheit der Benutzeroberfläche bieten CAD-integrierte Tools hochentwickelte Funktionalitäten. Die meisten – wenn nicht alle – physikalischen Phänomene, die für Simulationen wichtig sind und in denen Fluidströmung und Wärmeübertragung mithilfe von CFD abgebildet werden, können mit CAD-integrierten CFD-Tools modelliert werden. Aufgrund des direkten Zugriffs auf 3D-CAD-Daten über zugrundeliegende CAD-Kernel-Funktionen ist es möglich, hochentwickelte Algorithmen für die Identifizierung des Berechnungsraums (bzw. der Berechnungsräume), Generierung der Vernetzung, intelligente Anwendung physikalischer Bedingungen und automatische Anpassung der Solver-Konfiguration zu verwenden, um die lokale physikalische Situation zu erfassen, einschließlich der bereits erwähnten adaptiven Netzverfeinerung.

Zahlreiche Funktionen, die als hochentwickelte CFD-Features angesehen werden können, stehen als Standardfeatures zur Verfügung und werden in einer Sprache beschrieben, die jedem Ingenieur vertraut ist. Dazu gehören beispielsweise Kavitation, Verbrennung, Kondensation, Flüssigkeitsfilme, Erosion, Ablagerungen, nicht-Newtonsche Flüssigkeiten, transonische, Überschall- und Hyperschallströmungen, bewegliche/rotierende Teile, vollständig gekoppelte Wärmeübertragung, Strahlung mit spektralen Eigenschaften, Strahlenbrechung, Reflexion und Absorption (einschließlich Sonnenstrahlung), Joulesche Erwärmung und selbst der Peltier-Effekt in thermoelektrischen Geräten.

### ABSCHLIESSENDE BEMERKUNGEN

Wir halten an unseren fünf ursprünglichen Mythen fest und hoffen, unsere Überarbeitung hat Sie zum Nachdenken angeregt. Wir würden gerne Ihre Meinung zu diesen Problemen erfahren und Feedback von Ihnen erhalten.

Wenn Sie sich noch nicht mit dem Einsatz von CFD zur Unterstützung Ihres Konstruktionsprozesses befasst haben, können Sie gerne unseren CAD-integrierten, kartesischen, Immersed-Boundary-Ansatz testen. Denjenigen unter Ihnen, die bereits Erfahrung mit CFD-Tools mit konventionellen, körperangepassten Netzen haben und unserem Ansatz mit einem gesunden Maß an Skepsis gegenüberstehen, bieten wir die Möglichkeit, unsere Software selbst auszuprobieren. Melden Sie sich einfach für eine einmonatige Testphase an [11].

## REFERENZEN

1. „The Five Myths of Computational Fluid Dynamics“, NAFEMS BenchMARK Magazine, April 2008, S. 28-29.
2. „The Third Wave of CFD“, Ivo Weinhold und John Parry, Proceedings of the NAFEMS World Congress, Salzburg, Österreich, Juni 2013.
3. Baldwin High School in Kansas Wins Second Real World Design Challenge (RWDC) National Aviation Design Competition Using Mentor Graphics FloEFD Technology  
<http://www.mentor.com/company/news/baldwin-high-wins-second-real-world-design-challenge-using-floefd>
4. „High School Students Fly with FloEFD™“, Mentor Graphics' Engineering Edge Magazine, Band 1, Ausg. 1, <http://www.mentor.com/products/mechanical/engineering-edge/volume1/issue1/high-school>
5. „Turbulent Heat and Momentum Transfer in Rough Tubes“, M. R. Malin und J. D. Parry, The PHOENICS Journal of Computational Fluid Dynamics and its Applications, Band 1, Nr. 1, Januar 1988, S. 59-80.
6. „Flomerics' EFD Meshing Technology: A White Paper“, Dres. John Parry und David Tatchell
7. „Enhanced Turbulence Modeling in FloEFD“, Mentor Graphics Whitepaper MGC 02-11 TECH9670-W  
[http://s3.mentor.com/public\\_documents/whitepaper/resources/mentorpaper\\_65206.pdf](http://s3.mentor.com/public_documents/whitepaper/resources/mentorpaper_65206.pdf)
8. „Concurrent CFD: PLM-Embedded Computational Fluid Dynamics for Upfront Product Design“, Dres. John Parry, CEng & Ivo Weinhold, Proceedings of NAFEMS World Congress, Boston MA, Juni 2011.
9. „Back To The Future – Trends In Commercial CFD“, Dres. Keith Hanna und John Parry, Proceedings of the NAFEMS World Congress, Boston MA, Juni 2011
10. „Advanced Immersed Boundary Cartesian Meshing Technology in FloEFD“ MGC 02-11 TECH9690-W  
[http://s3.mentor.com/public\\_documents/whitepaper/resources/mentorpaper\\_65169.pdf](http://s3.mentor.com/public_documents/whitepaper/resources/mentorpaper_65169.pdf)
11. FloEFD und FloTHERM XT, <http://www.mentor.com/products/mechanical/>

## KONTAKTINFORMATIONEN

Dr. Ivo Weinhold [ivo\\_weinhold@mentor.com](mailto:ivo_weinhold@mentor.com) ; Dr. John Parry, CEng. [john\\_parry@mentor.com](mailto:john_parry@mentor.com)

Für aktuelle Produktinformationen rufen Sie uns an oder besuchen Sie: [www.mentor.com](http://www.mentor.com)

©2016 Mentor Graphics Corporation, alle Rechte vorbehalten. Der Inhalt dieses Dokuments ist Eigentum der Mentor Graphics Corporation. Der recht-mäßige Empfänger ist berechtigt, das vorliegende Dokument für interne Zwecke auszugsweise oder vollständig zu vervielfältigen, sofern dieser Hinweis auf allen Kopien erscheint. Durch Übernahme dieses Dokuments verpflichtet sich der Empfänger, die darin enthaltenen Informationen auf eine wirtschaftlich angemessene Weise vor unbefugter Nutzung durch Dritte zu schützen. Alle in diesem Dokument genannten Markennamen sind das Eigentum ihrer jeweiligen Inhaber.

**Unternehmenssitz**  
**Mentor Graphics Corporation**  
8005 SW Boeckman Road  
Wilsonville, OR 97070 USA  
Tel.: +1.503.685.7000  
Fax: +1.503.685.1204

**Silicon Valley**  
**Mentor Graphics Corporation**  
46871 Bayside Parkway  
Fremont, CA 94538 USA  
Tel.: +1.510.354.7400  
Fax: +1.510.354.7467

**Europa**  
**Mentor Graphics**  
**Deutschland GmbH**  
Arnulfstrasse 201  
80634 München  
Deutschland  
Tel.: +49.89.57096.0  
Fax: +49.89.57096.400

**Pazifischer Raum**  
**Mentor Graphics (Taiwan)**  
11F, No. 120, Section 2,  
Gongdao 5th Road  
HsinChu City 300,  
Taiwan, ROC  
Tel.: +886.3.513.1000  
Fax: +886.3.573.4734

**Japan**  
**Mentor Graphics Japan Co. Ltd.**  
Gotenyama Trust Tower 7-35, Kita  
Shinagawa 4-chome Shinagawa-ku  
Tokyo Japan 140-0001  
Tel.: +81.3.5488.3030  
Fax: +81.3.5488.3021



Vertrieb und Produktinformation: [sales\\_info@mentor.com](mailto:sales_info@mentor.com)

MGC 10-16 TECH12210-DE