

# Genau berechnet

## Konzept- und konstruktionsbegleitende Berechnungen in der Motorenentwicklung

Von Matthias Penzel

— Verkürzte Produktlebenszyklen und dadurch deutlich reduzierte Entwicklungszeiten auf der einen – höchste Erwartungen der Kunden an die Entwicklungsqualität auf der anderen Seite: Dass das kein Widerspruch sein muss, zeigt die Motorenentwicklung von Porsche Engineering am Beispiel der extrem frühen Einbindung von Berechnung und Simulation im Entwicklungsprozess.

Jahrzehntelang entstanden Bauteile und Baugruppen auf der Basis von Erfahrungen und vereinfachten Berechnungen der Konstrukteure. Bis zur Erprobung erster Funktionsmuster blieb der Beweis offen, ob die Theorie der Praxis standhält.

Mit der Einführung der computergestützten Simulationen bekamen die Ingenieure mächtige Werkzeuge an die Hand, die es erlauben, näher an Grenzen zu gehen, physikalische Gesetzmäßigkeiten und Werkstoffeigenschaften immer besser auszunutzen. Damit kann weitgehend die Phase der althergebrachten Trial & Error-Erprobungen entfallen. Versuch und Erprobung sollen vielmehr nur noch final die Zielfähigkeit des Entwicklungsstandes in der Realität bestätigen.

In der Anfangsphase der Konstruktion stößt die Simulation jedoch noch auf enge Grenzen: Ein sinnvoll ausgereifter Konstruktionsstand ist Grundvoraussetzung, um die Berechnungen zu starten. Abzuwarten bis die endgültige Konstruktion vorliegt, bedeutet aber einen enormen Zeitverlust. Die Berechnung mit Vernetzung, Processing und Auswertung benötigt geraume Zeit, die sich dann faktisch sequenziell in den Projektterminplan hineinaddiert. Zudem muss Zeit für eine Überarbeitung der Konstruktion auf Basis der Berechnungsergebnisse eingeplant werden. Eine gestaffelte Berechnungsfreigabe der Bauteile kann das Problem nur begrenzt minimieren, da Komponenten in komplexen Mechaniksystemen – wie etwa einem Verbrennungsmotor – in gegenseitiger Wechselwirkung stehen

und simultan entwickelt werden müssen. Das Schlagwort zur Lösung des Problems lautet Frontloading.

### Zeitersparnis durch Frontloading

Da in näherer Zukunft keine drastische Reduzierung des Zeitbedarfs für komplexe Simulationen im Computer-Aided Engineering (CAE) abzusehen ist, müssen Konstruktion und Simulation zeitlich so miteinander verknüpft werden, dass ein Optimum an Effizienz erreicht wird. Die Motorenentwicklung von Porsche Engineering verfolgt seit Jahren konsequent den Weg der konzept- und konstruktionsbegleitenden Berechnungen und Simulationen, was unter dem Begriff Frontloading zusammengefasst ist.

Diese Strategie basiert auf vier Säulen: Einen ersten Schritt bilden einfache numerische Auslegungshilfen und Programme. Diese sind bei Porsche Engineering oftmals Ergebnisse von Studien- und Abschlussarbeiten. So gelingt es, Forschung und Lehre mit direkten praktischen Anwendungen zu verknüpfen.

Die zweite Säule stellen die CAE-Tools dar – Finite Elemente- (FE-) Methode oder Computational Fluid Dynamics (CFD) –, die auf die Arbeitsumgebung der gängigen Systeme des Computer-Aided Design (CAD) zugreifen und direkt vom Konstrukteur bedient und genutzt werden. Dies reduziert Schnittstellenverluste und den Aufwand für Modellkonvertierungen. Zudem können Spitzen im Ressourcenbedarf der Simulationsgruppe entzerrt und größere Projekte ebenfalls ohne zusätzliche Unterstützung mit konstanter Mannschaft bearbeitet werden. Auch hier ist das Ziel, die zeit- und kostenintensive Vollsimulation auf die finale Bestätigung der Konstruktion zu beschränken und damit Entwicklungsschleifen einzuspa-

ren. Die relativ einfach zu bedienenden CAD-Berechnungstools wurden bei Porsche Engineering durch Vergleichsberechnungen und Bauteilversuche validiert und können bis zu einem bestimmten Gütegrad der Vorausberechnung zuverlässig eingesetzt werden.

Die dritte Säule bilden die vollwertigen Simulationen, die in eigener Softwareumgebung auf Hochleistungsrechnern laufen. Doch auch im Einsatz dieser hochwertigen Software findet man Potenziale zur Straffung des Projektterminplans. Gerade für strukturelle Fragen – beispielsweise für das System Zylinderkopf und -block – kann eine erste frühe FE-Verbundrechnung helfen, tendenzielle Schwachstellen zu identifizieren und zusätzlich konkrete Eingangsdaten für die Auslegung der Zylinderkopfdichtung zu generieren. Da der Reifegrad der Konstruktion zu diesem Zeitpunkt noch entsprechend gering ist, wird viel Erfahrung benötigt, um die Berechnungsergebnisse richtig zu interpretieren und entsprechende Maßnahmen abzuleiten. Hier greift die Motorenabteilung auf den Fundus einer Vielzahl vergleichbarer Projekte

zurück, die bereits in dieser Art berechnet worden sind. Das Know-how der Ingenieure bildet dabei das Rückgrat einer Entwicklungsstrategie, die zwar konsequent verschiedenste CAE-Methoden anwendet, aber auch den Output der künstlichen Intelligenz stets wertet und in puncto Plausibilität kritisch hinterfragt.

### Strukturoptimierung von Bauteilen und Baugruppen

Letzte Säule ist die Strukturoptimierung. Der Einsatz der entsprechenden Tools gehört prinzipiell ganz an den Anfang des Entwicklungsprozesses: in die Konzeptphase. Gerade bei völlig neuartigen Bauteilen ohne vergleichbare Vorgänger können damit frühzeitig Konstruktionen erarbeitet werden, die sich bereits nahe am gestalterischen Optimum bewegen.

Die konzeptionelle Auslegung von völlig neuen Bauteilen und Baugruppen stellt den größten Reiz, aber auch die größte Herausforderung für den Ingenieur dar. Es gilt dabei, unter Abschätzung



Mithilfe von CAE-Tools können Schnittstellenverluste reduziert werden und der Aufwand für Modellkonvertierungen verringert sich.

der auftretenden Belastungen die bestmögliche Materialverteilung innerhalb eines gegebenen Bauraums zu finden. Sehr erfahrene Ingenieure erzielen auch ohne CAE-Unterstützung beachtlich gute Ergebnisse, dies zeigen Nachrechnungen von älteren Konstruktionen. Beispielsweise das Kurbelgehäuse des Ur-911: Die Druckgusskonstruktion mit integrierten Lagerstühlen für den Kurbeltrieb ist ein Musterbeispiel harmonischen Designs und homogener Kraftflussverteilung. Jedoch: Festigkeit und Verformungsverhalten liegen für erfahrene Konstrukteure innerhalb des persönlichen Vorstellungsvermögens. Komplexe Fragen zum akustischen Verhalten zu beantworten ist dagegen schon weitaus schwieriger. Mittels simulationsgestützter Strukturoptimierung könnte beispielsweise auch das alte 911er-Gehäuse um mehrere Hundert Gramm erleichtert werden – ohne Einbußen an Funktionseigenschaften und Akustik.

Eine Strukturoptimierung beeinflusst die Bauteilkonstruktion meist signifikant. In der Regel können 10 bis 20 Prozent der Bauteilmasse eingespart oder in gleichem Maß die Steifigkeit gegenüber dem Erstentwurf gesteigert

werden. Die damit verbundenen drastischen Designänderungen sind jedoch nur in der anfänglichen Konzeptphase möglich. Alle späteren Änderungen erzeugen hohe Zusatzkosten, zudem sinkt die Erprobungstiefe und damit die Entwicklungsqualität, weil die Testergebnisse des alten Baustandes oftmals keine Rückschlüsse mehr auf das neue Konzept zulassen. Dies ist das wichtigste Argument für den Einsatz der Strukturoptimierung ganz am Anfang des Entwicklungsprozesses.

Im Rahmen von Weiterentwicklungen bestehender Produkte kann eine Strukturoptimierung ebenfalls sinnvoll sein. Modellpflege-Entwicklungen gehen oftmals mit dem Ziel einher, die Fahrzeugmasse zu reduzieren, wobei jedes Fachgebiet einen entsprechenden Beitrag leisten muss. Im Bereich Motor und Getriebe bieten sich die Strukturbauteile für eine Optimierung an, zumal wenn es sich um abgeschlossene Umfänge handelt und die Anschraubpunkte unverändert bleiben.

Beim Einsatz der Strukturoptimierung kommt es darauf an, diese Methodik ständig und standardmäßig anzuwenden. In der Motorenentwicklung bei

Porsche Engineering werden zu Beginn eines jeden Projektes die potenziellen Bauteile für Strukturoptimierungen identifiziert und berechnungsseitig eingeplant. Durch permanente Anwendung dieser Methodik ist es möglich, bei abgestimmten Randbedingungen bereits innerhalb eines Arbeitstages eine Strukturoptimierung durchzuführen. Auch ungeplante Umfänge können somit kurzfristig bearbeitet werden. Wird die Berechnung in die Nachtstunden verlegt, kann der Konstrukteur zu Beginn des nächsten Arbeitstages die Ergebnisse direkt in seine Arbeit einfließen lassen.

Im Einzelnen fallen unter den Begriff Strukturoptimierung verschiedene Teilgebiete wie zum Beispiel

- die Topologieoptimierung als gestalterische Verbesserung unter minimalem Materialeinsatz bei maximaler Steifigkeit,
- die Formoptimierung zur Gestaltung hochbelasteter Bauteilzonen,
- die Querschnittsoptimierung als Hilfsmittel für belastungsgerechtes Design an Flächenkonstruktionen (beispielsweise Tailored Blanks).

## Vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in der Motorenentwicklung

Die Hauptanwendungen in der Motorenentwicklung von Porsche Engineering liegen meist darin, die Masse und/oder Steifigkeit von Bauteilen zu verbessern sowie das akustische Übertragungsverhalten durch gezielte Entwicklung auf bestimmte Eigenfrequenzen hin zu beeinflussen. Die spezielle Software erlaubt es dabei, auch fertigungstechnische Randbedingungen zu berücksichtigen, wie beispielsweise minimal zulässige Wandstärken und die Vermeidung von Hinterschnitten für Guss- und Schmiedeteile.


Die konkreten Anwendungsmöglichkeiten der Strukturoptimierung in der Motorenentwicklung sind extrem vielfältig. Der klassische Einsatzfall sind die genannten tragenden Strukturbauteile wie Motorträger und Aggregatekonsolen, aber auch Teilgeometrien wie Ölrückläufe, Anbindung der Lagerstuhlverschraubungen in einem Kurbelgehäuse oder Nockenwellen-Lagerstühle werden konsequent optimiert. Neben der eigentlichen technischen Verbesserung am Bauteil ergibt sich zudem ein weiterer Effekt: Durch den ständigen Umgang mit diesen Aufgaben und den CAE-Ergebnissen lernen die Konstrukteure, Lastfälle und Strukturverhalten der Bauteile vorab noch besser einzuschätzen und zu bewerten. Diese Erfahrungen über Gestaltungsprinzipien werden dann auch auf völlig andere Komponenten und Fachgebiete übertragen. Das hilft den Ingenieuren, in akuten Problemfällen Hotspots und strukturelle Schwächen schnell zu erkennen.

Damit sind die Einsatzmöglichkeiten bei Weitem nicht erschöpft: Für die Auslegung einer Motorenfamilie mit sinnvollem Gleichteileumfang im Grundmotor wurde zuletzt die Strukturoptimierung für eine DOE-Kas-

### Einlasskanal-Optimierung


Mit dem Optimierungstool wird die Geometrie des Einlasskanals auf Änderungssensitivität bezüglich Druckverlust und Strömungsdrall (tumble) bewertet.

Sensitivität Druckverlust



Eindrücken

Sensitivität Strömungsdrall

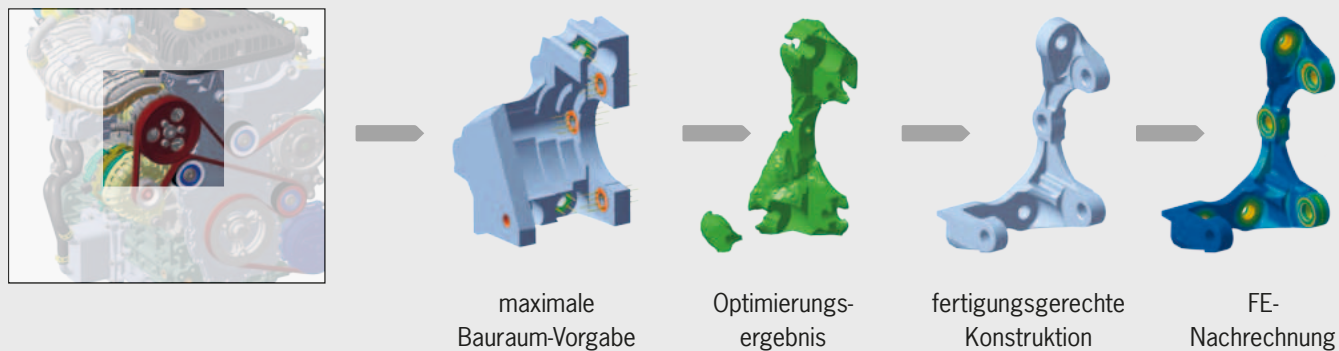


Herausziehen

Durch Herausziehen der roten Bereiche und Eindrücken der blauen Regionen lassen sich der Druckverlust im Kanal reduzieren und gleichzeitig der Strömungsdrall verstärken.

## Konstruktionsbegleitende Berechnungen

Leichtbau durch Strukturoptimierung



kade (Design of Experiments) zu Konzeptfragen herangezogen. Dabei ging es um die Bewertung verschiedener Hub-/Bohrungsverhältnisse in Bezug auf Bauraum, Masse und erzielbarer Kurbeltriebssteifigkeit im Vergleich mit bestehenden Motoren ähnlicher Leistungsgewichte.

## Enormes Entwicklungspotenzial

Simulations- und Konstruktionsmethoden werden bei Porsche Engineering stetig und im gegenseitigen Abgleich weiterentwickelt. Neue Methoden wie beispielsweise die seit Kurzem einsatzbe-

reite vernetzte Einlasskanal-Auslegung (Morphing) zeigen enormes Potenzial, Entwicklungszeiten weiter zu reduzieren und gleichzeitig die Entwicklungsqualität kontinuierlich zu steigern.

Der Zeit- und Qualitätsvorteil des frühen Einsatzes von CAE-Simulationen in der Motorenentwicklung – und nicht nur dort – liegt klar auf der Hand. Um dieses Potenzial erfolgreich zu nutzen, müssen die Anwender über umfassende Erfahrungen verfügen, wie die Ergebnisse im Kontext der Unschärfen aus dem noch geringen Konstruktionsreifeegrad zu werten und zu interpretieren sind. ■