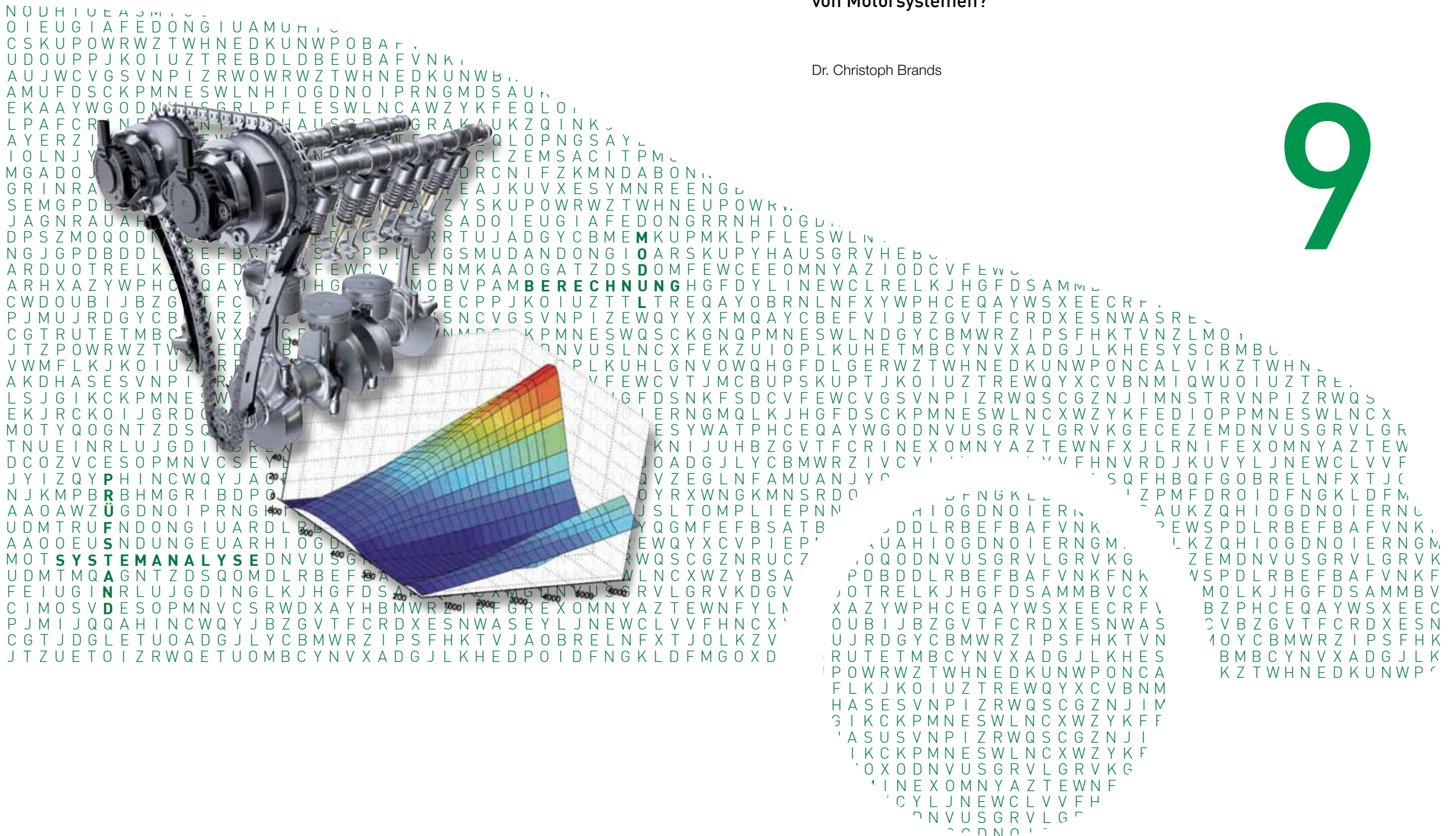


Ganzheitliche Simulation

Der zukünftige Weg zur Berechnung
von Motorsystemen?

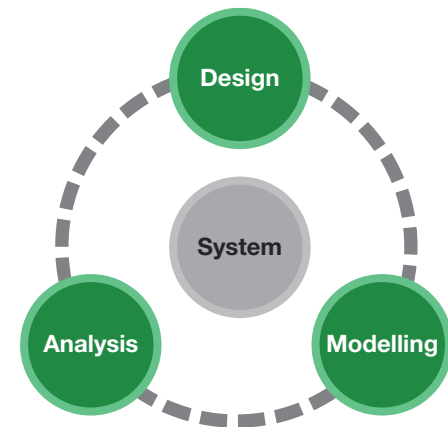
Dr. Christoph Brands

9



Einleitung

Immer kürzere Entwicklungszeiten, eine weiter steigende Variantenvielfalt sowie eine stetig wachsende Komplexität der Systeme treiben als Megatrends die Abläufe in den



Wertschöpfungsketten der Automobil- und Zulieferindustrie. Um Druck aus den Prozessen zu nehmen, gewinnt die virtuelle Produktentwicklung immer mehr an Bedeutung. Die technische Berechnung kann bei entsprechender Einbindung in vielen Bereichen durch schnelle Antwortzeiten dazu beitragen, die Entwicklungszeiten zu verkürzen.

Kaum eine Technik hat die Abläufe in der Produktentwicklung so geändert wie die Digitalisierung der Prozesse. Dabei haben sich jedoch nur die Werkzeuge und die Vorgehensweise geändert. Die Kernaufgaben für den Ingenieur hingegen nicht. Bild 1 zeigt die Hauptaufgaben der technischen Berechnung. Zu ihnen zählen

- Systemanalyse und Modellbildung,
- Durchführung der Analyse, also der eigentlichen Berechnung,
- Ableiten von Design- und Konzeptvorschlägen aus den Ergebnissen.

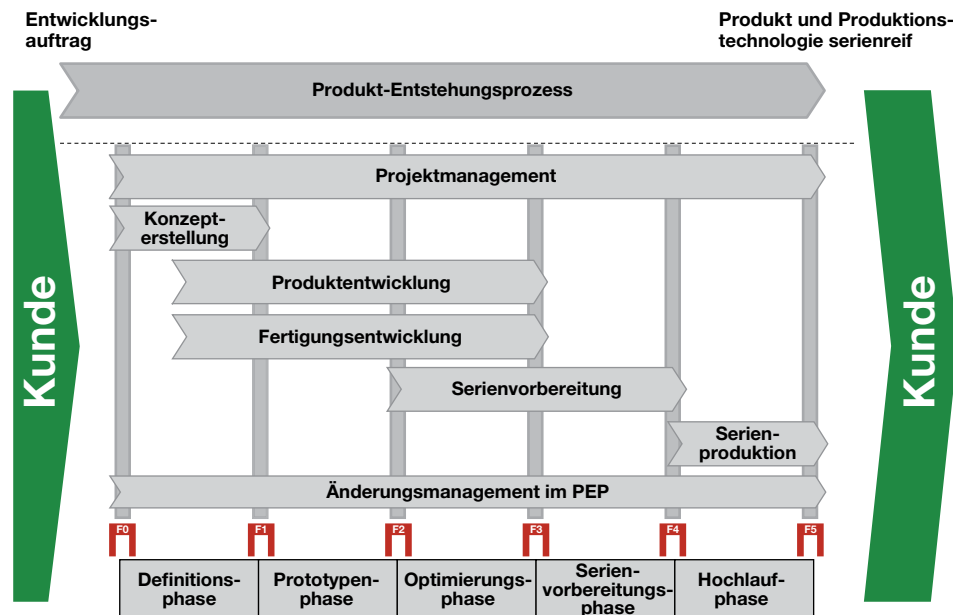


Bild 1 Aufgaben der technischen Berechnung während der Produktentwicklung

Systemanalyse und Modellbildung

Modellbildung ist immer eine Vereinfachung des realen Systems. Die Simulation liefert nur Ergebnisse, die sich auf das Modell und seine Grenzen beziehen. Um eine Übertragbarkeit gewährleisten zu können, muss deshalb zunächst sichergestellt sein, dass das Modell – je nach Detaillierungsgrad – in den gewünschten Systemgrenzen bei Variation der Parameter die richtigen Tendenzen bis hin zu den richtigen quantitativen Ergebnissen liefert. Diese Validierung geschieht in der Regel durch Vergleich mit Versuchsdaten. Je nach Kenntnis über das reale System können verschieden detaillierte Modelle aufgebaut werden. Sind die physikalischen Zusammenhänge im realen System nicht bekannt, kann zumindest ein mathematisches Modell aufgebaut werden, das nach einer Änderung im Eingang das beobachtete Ergebnis im Ausgang liefert. Im einfachsten Fall ist dies eine Regression der vorhandenen Versuchsdaten (Datenbasierte Modellierung).

Sind die physikalischen Zusammenhänge hingegen verstanden und liegen genügend zuverlässige Eingabedaten vor, können analytische Ansätze oder komplexe physikalische Modelle aufgebaut und numerisch gelöst werden.

Anders als in einigen Naturwissenschaften gehören in der Ingenieurwissenschaft Vereinfachungen zum täglichen Geschäft. Die Abstraktion beziehungsweise Vereinfachung ist ein wesentliches Mittel, sich komplexen Systemen zu nähern. Bekanntes Beispiel ist das Pendel, das vereinfacht als Punktmasse an einem masselosen Faden betrachtet wird. Für kleine Winkel wird dann durch Taylor-Annäherung $\sin(\Phi(t)) \approx \Phi(t)$ gesetzt. Auch für die

Modellbildung ist der Mut zur Lücke eine wichtige Basis. Dabei gilt es, im Rahmen einer Systemanalyse alle erforderlichen Effekte zu identifizieren und in der Modellbildung zu berücksichtigen, um die gestellten Fragen beantworten zu können. Um die Rechenzeiten beziehungsweise die numerische Berechenbarkeit (Stabilität) sicherzustellen, darf das Modell jedoch nicht überfrachtet werden. Schließlich muss je nach Fragestellung das passende Modell mit dem richtigen Werkzeug bearbeitet werden.

Eine der Hauptaufgaben der technischen Berechnung ist daher zunächst die Systemanalyse und die Modellbildung. Im Anschluss sind die extern und intern zur Verfügung gestellten Eingabedaten auf Plausibilität zu prüfen und gegebenenfalls für die Simulation im geeigneten Format vorzubereiten. Das gilt für geometrische Daten aus CAD-Systemen ebenso wie für Funktionsdaten, zum Beispiel Steifigkeitskennlinien. Das Überprüfen der Eingabedaten ist äußerst wichtig, da alle Ergebnisse unter anderem von der Datenqualität abhängen. Sämtliche Prozessschritte müssen durch ein geeignetes Änderungsmanagement begleitet werden: Ändern sich zum Beispiel geometrische Daten, muss dies kommuniziert werden.

Äußere Einflussfaktoren

Als Baustein im Produktentstehungsprozess unterliegt die technische Berechnung ebenso wie alle anderen beteiligten Abteilungen äußeren Einflussfaktoren. Dabei kann es sich um gesellschaftliche Wünsche, wirtschaftliche Notwendigkeiten oder technische Erfordernisse handeln (Bild 2). Der Automobilbau ist derzeit vor allem durch das Bemühen beeinflusst, immer energieeffizientere Fahrzeuge zu bauen.

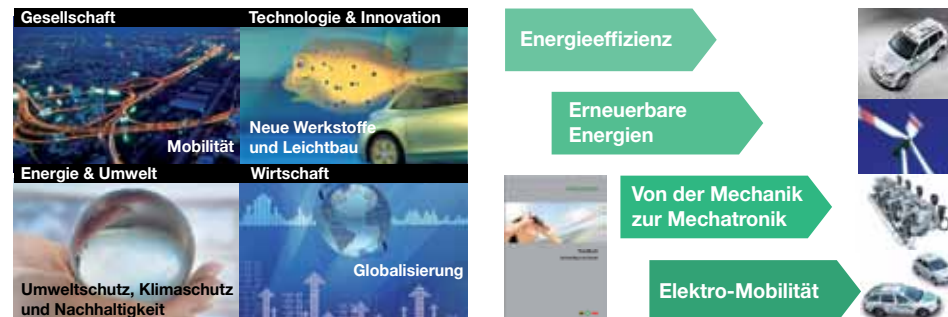


Bild 2 Trends in der Automobilindustrie

Aus diesem übergeordneten Streben nach mehr Effizienz ergeben sich Entwicklungen wie

- eine optimierte innermotorische Energieumsetzung durch Variabilität im Luftpfad (VT, VCT, ECP),
- die Reduktion mechanischer Verluste durch optimierte tribologische Systeme,
- Leichtbau und
- die Maßnahmen zur Elektrifizierung des Antriebsstrangs.

Neben den Kundenwünschen nach sparsamen Pkw und der Selbstverpflichtung der

Automobilindustrie treibt auch eine immer schärfere CO₂-Emissionsgesetzgebung die gesamte Fahrzeugindustrie an, immer effizientere Motoren beziehungsweise Fahrzeuge zu bauen.

Die technische Berechnung muss sich auf derlei Rahmenbedingungen einstellen und entsprechende Kompetenzen und Methoden aufbauen. So erfordert die richtige Bewertung der innermotorischen Maßnahmen ein umfangreiches thermodynamisches Wissen. Die immer komplexeren Systeme zur Steigerung der Variabilität müssen verstanden sein, um diese durch ein Simulati-

Wirkungsgradkette „Well to Wheel“

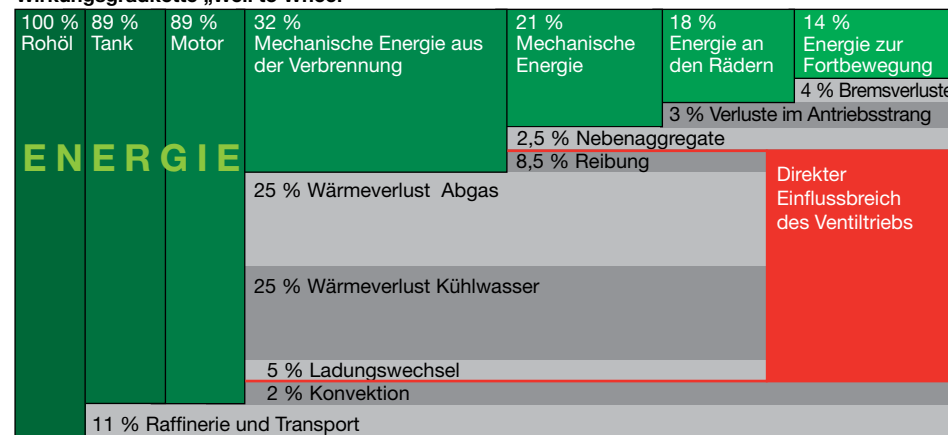


Bild 3 Energieverluste von der Rohöl-Förderung bis zum Fahrbetrieb „Well to Wheel“

onsmodell abbilden zu können. Das gleiche gilt für Komponenten und Systeme zur Elektrifizierung beziehungsweise Hybridisierung. Auch eine Methodenkompetenz zur hinreichend genauen Vorhersage von reibungsminimierenden Maßnahmen muss aufgebaut werden. Ansatzpunkt für weitere Effizienzsteigerungen zeigt Bild 3. Da um 2020 je nach Quelle bis zu 1,5 Milliarden Fahrzeuge weltweit in Gebrauch sein und weit über 90 % davon einen Verbrennungsmotor haben werden, lohnt sich jegliche Optimierung am Verbrennungsmotor.

Neben diesen technischen Trends hat auch die Globalisierung starken Einfluss auf die Entwicklungsarbeit in der Automobilindustrie und damit auf die technische Berechnung. So werden Grundmotoren (World engines) in sehr großen Stückzahlen gebaut und dann durch unterschiedliche Leistungsstufen und Ausstattungen an den Aggregaten an die jeweiligen Fahrzeugklassen angepasst. Dies erfordert von der technischen Berechnung robuste Methoden, da Schwächen oder Fehler in der Auslegung bei großen Stückzahlen schwerwiegende wirtschaftliche oder Image schädigende Folgen haben können. Zudem müssen die Modelle auch die einzelnen Varianten abbilden können.

Als Folge der Globalisierung findet auch die Produktion in unterschiedlichen geographischen Regionen mit unterschiedlichen Zulieferern und teilweise unterschiedlichen Werkstoffen statt. Dies hat zur Folge, dass auch die Entwicklungsteams global verteilt zusammenarbeiten und die damit verbundenen interkulturellen, regionalen und methodischen Probleme lösen müssen.

Um das volle Potenzial der technischen Berechnung ausspielen zu können, ist eine frühe Einbindung aller Abteilungen und eine kontinuierliche Zusammenarbeit erforderlich. Dies gilt vor allem für Neuentwicklungen. Bei bekannten Komponenten oder Systemen existieren vielfach bereits Spezifikationen und Standardgrenzwerte, die weltweit genutzt werden.

Bei der hohen Komplexität neuer Systeme und der verwendeten Software ist es nicht möglich, kurzfristig Simulationsmodelle aufzubauen, die im Rahmen der festgelegten Grenzwerte zuverlässig Ergebnisse liefern und damit bestätigen, dass die gewünschte Funktion in den Betriebsparametern gegeben ist. Bei komplexen Systemen kann der Aufbau der Entwicklungsumgebung, also der Modelle und Prozesse, teilweise Jahre dauern. Danach liegen allerdings validierte Modelle und Vorgehensweisen vor, die robust arbeiten und selbst auf unvorhergesehene Fragestellungen in kurzer Zeit Antworten liefern können. So entstehen Zeit- und Kostenvorteile, die den eigentlichen Nutzen der technischen Berechnung darstellen.

Interne Einflussfaktoren

Die einzelnen Phasen des Produktentstehungsprozesses (PEP) sind mit unterschiedlichen technischen Fragestellungen aus Fertigung oder Produktentwicklung verbunden. Auch dies hat Auswirkungen auf die Modellbildung. So liegen in frühen Projektphasen regelmäßig nur wenige belastbare Eingabedaten vor. Gleichzeitig werden zu diesem Zeitpunkt vom Automobilhersteller und auch vom Zulieferer noch viele Veränderungen vorgenommen, so dass zunächst nur die Haupteffekte untersucht werden können, die zur richtigen Konzeptentscheidung (Designfindung beziehungsweise -festlegung) führen. Bei bekannten Komponenten oder Systemen können fehlende Angaben vorläufig durch Werte aus vorhandenen Datenbanken ersetzt werden. Die Ergebnisse der Simulation gelten dann natürlich nur unter diesen Annahmen und müssen später durch reale Werte ersetzt werden. Neben dieser zeitlichen Komponente im PEP unterscheidet sich die Arbeit der technischen Berechnung auch durch die vorhandene Erfahrung mit dem zu entwickelnden System.

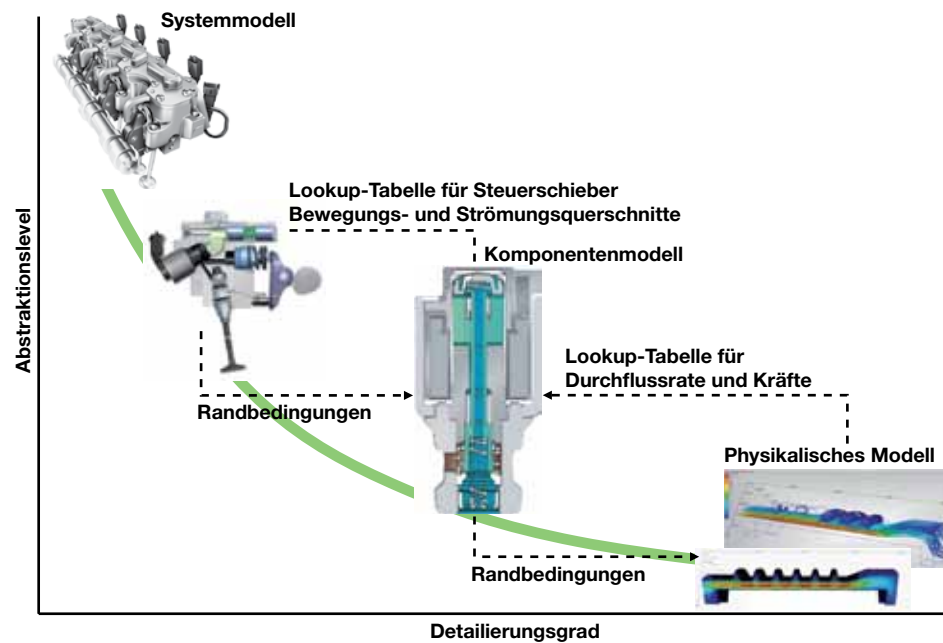


Bild 4 Modellbildung und Systemanalyse

Bei bekannten Produkten sind in der Regel bereits alle wiederkehrenden Abläufe automatisiert oder zumindest per Spezifikation festgelegt (Bild 4). Speziell für globale Projekte ist dies unerlässlich. Nach der Automatisierung der Werkzeuge können sie teilweise an die Projektengineure weitergegeben werden, die dann kleinere Berechnungen eigenständig durchführen und von schnellen Antwortzeiten profitieren. So ist zum Beispiel bei der Auslegung eines Schlepphebels die Frage nach seiner Steifigkeit relevant. Schaeffler hat diese Berechnung komplett automatisiert und in ein CAD-System integriert. In 99 % aller Fälle versendet das System bereits wenige Minuten nach Berechnungsstart per Mausklick einen automatisiert erzeugten Bericht per E-Mail an den Projektengineur.

Anders sieht es bei der Entwicklung neuer Anwendungen aus. Diese ist durch unterschiedliche Modelltiefen als Folge der einzelnen Phasen des Produktentstehungsprozesses und unterschiedliche Frage-

stellungen der beteiligten Spezialisten geprägt. So stellt die Produktionsvorbereitung andere Fragen als beispielsweise die Softwareentwicklung, die die Funktionen für die Motorsteuerung programmiert. Ein Gesamtmodell aufbauen zu wollen, das alle diese unterschiedlichen Fragestellungen beantworten kann, ist in der Regel zu aufwendig, zu rechenzeitintensiv und teilweise auch unmöglich. Vor diesem Hintergrund ist es zu verstehen, dass es sich bei einem Modell um einen zu einer speziellen Fragestellung gehörenden Ausschnitt der Realität handelt und nicht um ein umfängliches Abbild.

Ein Beispiel für sehr unterschiedliche Fragestellungen in der zeitlichen Abfolge des PEP ist das multiphysikalische Simulationsmodell des Schnellschaltventils aus dem vollvariablen Ventiltrieb UniAir (Bild 5).

Das UniAir-System besteht aus einem von einer Nockenwelle betätigten Aktuator mit integriertem schnellschaltenden Hydraulikventil und einer Ventilsteuerungssoft-



Bild 5 UniAir-System

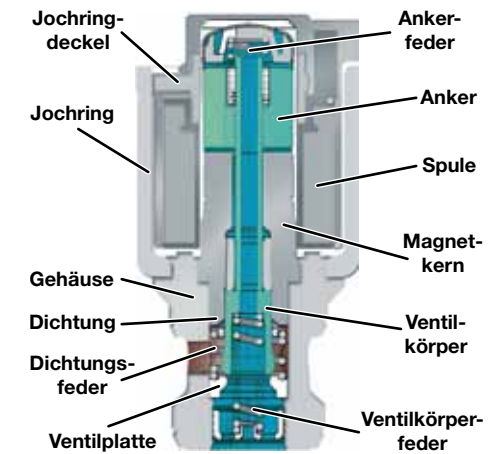


Bild 6 Schnellschaltventil

ware [1]. Bei dem Schaltventil handelt es sich um ein unbestromt offenes 2-2-Wege Schaltventil, bei dem durch Verschieben eines Ventilkörpers gegenüber dem Ventilsitz die Verbindung zwischen Hochdruckraum und Mitteldruckraum geöffnet und geschlossen werden kann.

Für die Modellierung des Schnellschaltventils (Bild 6), wurde ein multiphysikalisches Modell erzeugt, das die mechanisch-hydraulischen, die magnetischen und die elektrischen Zusammenhänge abbildet. Bild 7 zeigt den Spulenstrom. Nach einer Vorbestromung werden durch Anlegen der Maxi-

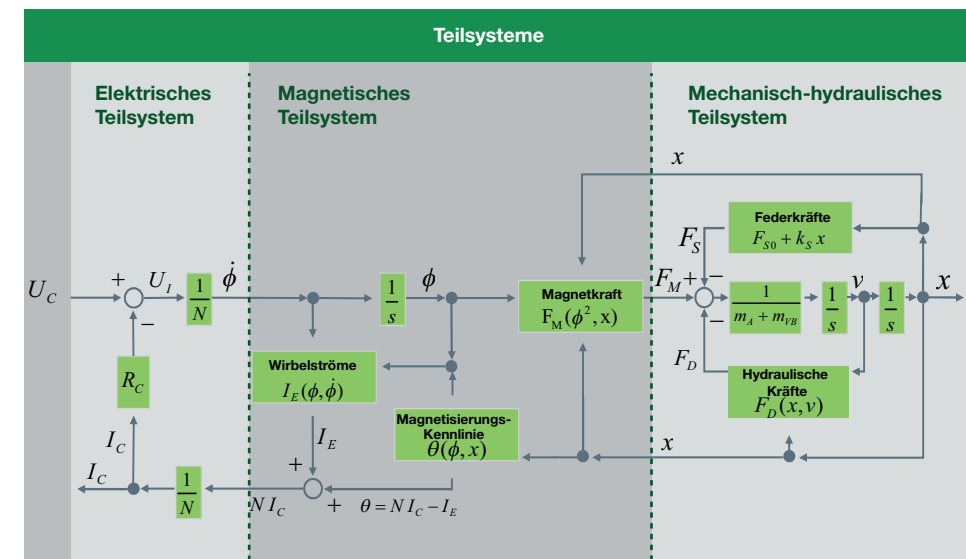


Bild 7 Physikalische Wechselwirkungen beim Schnellschaltventil

malspannung ein magnetischer Fluss sowie gleichzeitig der Spulenstrom und die Magnetkraft aufgebaut, sodass sich das Ventil schließt. Nach dem Erreichen des Maximalstroms zeichnet sich durch eine Ansteuerung mit konstantem Verhältnis der Pulsweitenmodulation (PWM) zwischen 0 V und 12 V der Schließzeitpunkt durch einen Knick im Stromsignal ab („V-Shape“). Während der folgenden sogenannten Haltephase sorgt ein im Vergleich zur Spitzenphase verringerter Strom einerseits für ein sicheres Halten der geschlossenen Position des Ventils, andererseits für einen nicht unnötig hohen Energieverbrauch [2].

Zum Öffnen des Ventils wird die Spule gegen die Z-Diode geschaltet. Dies führt über den raschen Abbau der Magnetkraft zu einem schnellen Öffnen. Die Detektion der Öffnungszeit erfolgt durch Kurzschließen der Magnetspule, sodass sich durch die Restmagnetisierung ein Strom aufbaut, in dem sich über die magnetisch-mechanische Kopplung der Bewegungsverlauf im Stromsignal abzeichnet. Durch Abheben und Überspringen des Ankers als magnetisch aktivem Teil kann der genaue Öffnungszeitpunkt allerdings nur mit einem höheren Aufwand als der Schließzeitpunkt ermittelt werden.

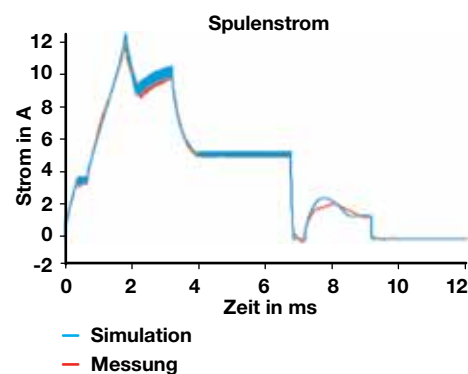


Bild 8 Vergleich der Ergebnisse von Messung und Simulation

Bei Berücksichtigung aller notwendigen Zusammenhänge ergibt sich eine hohe Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Messung und der Simulation (Bild 8). So lässt sich mit dem Modell beispielsweise der Einfluss einer Leckagespalt-Variation auf die Funktion beantworten. Derlei Fragen kommen typischerweise aus der Fertigungsplanung, da je nach Größe des Leckagespalts unterschiedliche Kosten entstehen.

Weniger geeignet ist das Modell, um Fragen der Softwareentwickler zu beantworten, die die Funktionalität für das Steuergerät zur Verfügung stellen. Dazu ist ein echtzeitfähiges Modell erforderlich, bei dem die Simulationszeit, ähnlich wie in einem Flugsimulator, der real verstrichenen Zeit entspricht.

Analyse

Nach der Systemanalyse und Modellbildung folgt die Analyse. Im einfachsten Fall geht es dabei um eine Berechnung mit entsprechender Software. Es kann sich aber auch zunächst um eine Modellüberprüfung beziehungsweise um eine sogenannte Sensitivitätsanalyse handeln, die dann auf die Modellbildung rückwirken kann. Ziel dieser Überprüfung unbekannter oder neuer Modelle ist es, sensitive Parameter zu identifizieren, um die Anzahl der zu untersuchenden Parameter klein zu halten und damit Rechenzeit zu sparen. So wird zum Beispiel in einer Finite-Elemente-Berechnung der Temperatureinfluss bei Komponenten im Zylinderkopf aus Stahl nicht variiert, da sich bei den dort vorherrschenden Temperaturen der Elastizitätsmodul als dominierender Einflussparameter kaum verändert.

Die Modellüberprüfung beantwortet die Frage, welche Parameter zu variieren sind. Steht diese Liste fest, können durch Optimierungsalgorithmen wie DoE (Design of Experiments) während der Analyse die Eingabeparameter so variiert werden, dass die gewünschten Aussagen erreicht werden.

Durch Anwendung dieser Verfahren kann die Berechnung auch Empfehlungen für Grenzmuster an den Versuch geben. Für die Optimierung früher Entwicklungsstadien stehen daneben zahlreiche weitere Verfahren zur Verfügung.

Entwurfsunterstützung

Zu den Kernaufgaben der technischen Berechnung zählt das Ableiten von Entwurfsbeziehungsweise Konzeptvorschlägen. Das nachfolgende Beispiel zeigt eine ganzheitliche Simulation zur Optimierung eines Steuertriebs mit dem Ziel einer Reibungsminimierung.

Bei dynamischen Systemen sorgt Reibung auf der einen Seite für die notwendige Dämpfung, führt auf der anderen Seite aber auch zu Wirkungsgradverlusten. Zur Beantwortung der Frage, welche Verbrauchsreduzierung sich durch eine Reduzierung der Reibung am Steuertrieb erzielen lässt, sind kalibrierte Motormodelle und entsprechende Daten vom Fahrzeug erforderlich. Hierzu lassen sich die gleichen Methoden und Modelle verwenden, die zur Beurteilung von Potenzialen komplexer Ventiltriebstrategien aufgebaut wurden.

Zunächst gilt es, die Auswirkungen auf die Verbrennung im Modell realitätsnah abzubilden. Aufgrund der Vielzahl an Kombinationen der Eingangsdaten kommen aufgrund ihrer besonderen Effizienz zur Vorausberechnung der Wärmefreisetzung sogenannte quasidimensionale Verbrennungsmodelle zur Anwendung. Damit können geänderte Betriebsbedingungen wie Drehzahl, Last, Restgasanteil, Luftverhältnis und Veränderungen der Ladungsbewegung bewertet werden. Zur Analyse von Änderungen der Klopfeigung und der resultierenden Schwerpunkt-lage wird bei Schaeffler ein Arrhenius-Ansatz genutzt. Für die Berücksichtigung der mechanischen Verluste kommt ein physikalisch basierter Ansatz nach Fischer zur Anwendung. Die Ermittlung der Parameter für den jeweils besten Kraftstoffverbrauch erfolgt an stationären Kennfeldpunkten, die sich aus der Häufigkeitsverteilung für die untersuchte Motor-Fahrzeug-Kombination im jeweiligen Fahrzyklus ergeben. Zur optimalen Auslegung der Entwurfsparameter bei einer Vielzahl an möglichen Varianten im relevanten Kennfeldbereich kommen stochastische Optimierungsverfahren zum Einsatz. Die endgültige Bewertung der unterschiedlichen Entwurfsstrategien im Motor-Fahrzeug-Verbund erfolgt in verschiedenen Fahrzyklen mithilfe der Gesamtfahrzeugsimulation (Bild 9).

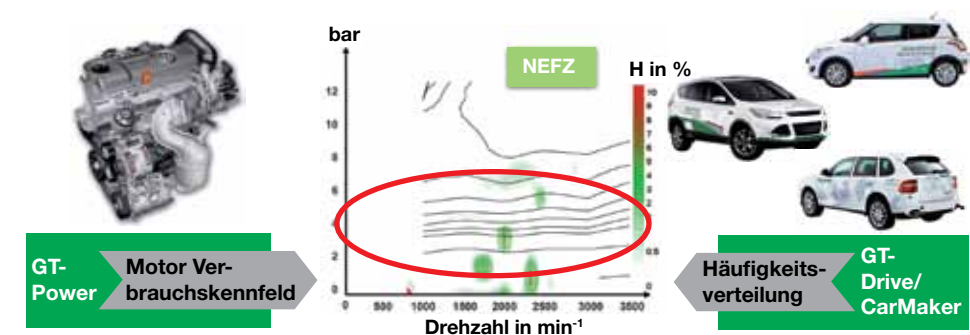


Bild 9 GT-Power-Modellierung

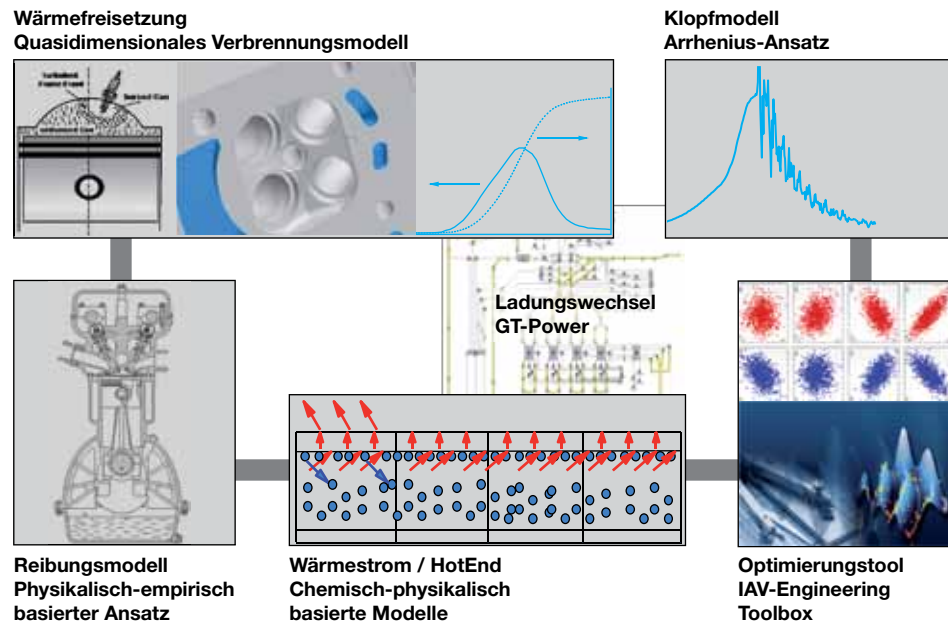


Bild 10 Verbrauchsrechnung mit GT-Power

Die in Bild 10 dargestellten Modelle und Werkzeuge zur Optimierung dienen zur Vorausberechnung des Normverbrauchs [3].

Um die entsprechenden Daten in das GT-Power-Modell eingeben zu können, muss die Reduktion der Reibung im Steuertrieb, die für 0,5 bis 2 % der Gesamtwirkungsgradverluste verantwortlich ist [4], genauer betrachtet werden.

Reibung lässt sich nicht völlig vermeiden. Dennoch gilt es, Verluste zu minimieren und die Einflüsse und Wechselwirkungen innerhalb der betrachteten Systeme zu verstehen. Ein gezielter Nutzen der Reibung zur Optimierung des Kettentriebs spielt durch ihre dämpfenden Eigenschaften zur Begrenzung dynamischer Kraftüberhöhungen eine große Rolle. Die meisten tribologischen Systeme im Verbrennungsmotor durchlaufen während des Betriebs oder während der Startvorgänge unterschiedlich häufig die Reibungsarten Haft-, Grenz- und hydrodynamische Reibung.

Nach der Identifikation der zeitlich und örtlich unterschiedlichen Reibungsphänomene und unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen innerhalb der Systeme können geeignete Maßnahmen ausgewählt und kombiniert werden, um die maximale Wirkung zu erzeugen.

Die im kettenbetriebenen Steuertrieb wirkenden Reibungsarten sind in Bild 11 dargestellt. Sie umfassen den Zahneingriff zur Kette (A), die Reibung innerhalb des Kettengelenkes (B) und die Reibung zwischen Kette und den Schienen (C). Dazu kommen noch die Reibung an den Lagern von Kurbel- und Nockenwelle sowie möglicher Nebenantriebe (D) und die Verluste innerhalb der Spannelemente (E).

Bei der Modellierung von Reibung in Mehrkörpersystemen stehen zwei Problemstellungen im Vordergrund. Die erste besteht in einer physikalisch korrekten Beschreibung der Reibkonfigurationen des Haftens und Gleitens mittels entsprechen-

der Differenzialgleichungen und deren numerische Lösung für eine transiente Simulation. Oft werden die Möglichkeiten der physikalischen Beschreibung von Haften und Gleiten von den zur Verfügung stehenden Lösungsalgorithmen bestimmt. Im Hinblick auf die Dissipation von Energie und die hohe Dynamik des Systems Steuertrieb/Kettentrieb ist die Veränderlichkeit des Reibkoeffizienten im Haftzustand von geringerer Bedeutung, sodass ein Losbrechkoeffizient angegeben werden kann. Das zweite Problem ist die Bestimmung des Reibkoeffizienten beim Gleiten beziehungsweise der kinematischen Größen und

physikalischen Parameter, die den Reibungskoeffizienten beeinflussen.

Der Übergang vom Haften zum Gleiten wird durch ein neues Modell beschrieben, das bei Schaeffler erstmalig in einem Simulationsprogramm angewandt wird. Dabei wird das Haftpotenzial eines noch stillstehenden Kontakts gegenüber einer virtuellen Verschiebung bilanziert. Das Haftpotenzial wird berechnet durch die den Kontakt beschreibenden Parameter wie Haftreibungskoeffizient, Geschwindigkeit und Normalkraft. Wird das Haftpotenzial eines Kontaktes überschritten, tritt Gleiten ein.

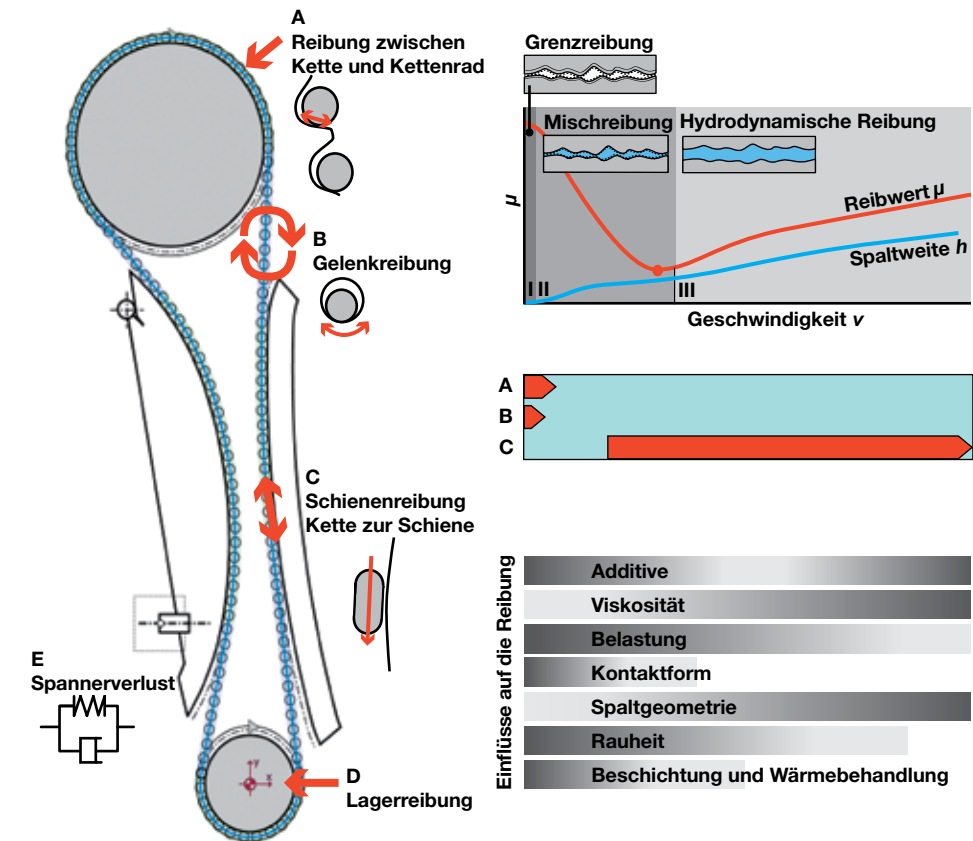


Bild 11 Reibstellen am Steuertrieb

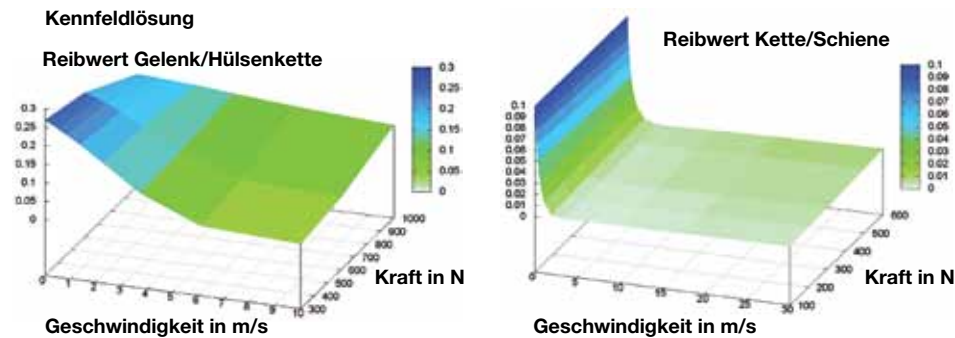


Bild 12 Kennfelder des Reibungskoeffizienten und des Mischreibungszustands

Sobald das System in Bewegung gerät, ist zur Quantifizierung der Reibung im Kontakt die Ermittlung des Gleitreibungskoeffizienten erforderlich. Dabei handelt es sich um eine variable Größe, die sich je nach Art und Zustand des tribologischen Systems verändert. Daher ist für die energetische Betrachtung des Systems die Beschreibung des Reibkoeffizienten während der Gleitphase von Bedeutung. Im Gleitzustand wird der

Reibungskoeffizient mittels Zustandsgrößen wie Geschwindigkeit und Belastung durch Kennfelder beschrieben.

Bild 12 zeigt auf der linken Seite beispielhaft für den Kontakt des Kettengelenks einer Hülseketten den in Modellversuchen ermittelten Reibkoeffizienten im Kennfeld. Dieses Kennfeld ist abhängig von der Gleitgeschwindigkeit und der Normalkraft ermittelt worden. Der Haftrei-



Spezifikationen des hochdynamischen Kettenprüfstands

- Hydrostatisch gelagerte Wellen
- Antriebsmotor mit Drehungleichförmigkeiten ähnlich einer Kurbelwelle
- Bremsmomente ähnlich wie Nockenwelle
- Konstante Bremsmomente möglich
- Direkte Schienenreibungsmessung
- Konditionierung von Ölmenge und -temperatur

Bild 13 Hochdynamischer Kettenprüfstand

bungskoeffizient liegt bei etwa 0,25. Mit steigender lokaler Gleitgeschwindigkeit sinkt der Koeffizient auf etwa 0,01 ab. Bei steigenden Normalkräften steigt der Reibwert durch Zunahme des Festkörperanteils an. Im rechten Diagramm von Bild 12 ist das Reibwertkennfeld des Kontakts der Kette zur Schiene in gleicher Weise abgebildet. Diese Kennfelder werden für jede Reibstelle (A, B und C) im Steuertrieb eines jeden Kettentyps unter Berücksichtigung der weiteren, relevanten Parameter wie Ölmenge und -zustand, Werkstoffkombination und Rauheit ermittelt. Sie stehen dann der Simulation als Randbedingungen zur Verfügung und ermöglichen eine Quantifizierung der Reibverluste.

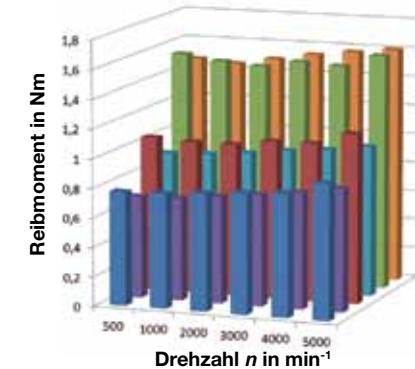
Um die Modellbildung zu validieren und Parameter der Reibmodellierungen zu beschaffen, bauten Schaeffler und IFT einen hochdynamischen Kettenprüfstand auf. Er besteht aus einem antreibenden und einem bremsenden Elektromotor. Damit können nicht nur kurbelwellennahe, dynamische Drehungleichförmigkeiten, sondern auch Bremsmomente einer Nockenwelle abgebildet werden, um reale Randbedingungen nachzubilden. Bild 13 zeigt den Aufbau beispielhaft.

Die Versorgungseinheit der Kette mit Öl wird durch ein externes Ölaggerat realisiert. Dieses befindet sich in unmittelbarer Nähe des Prüfstands. Heiz- und Kühlmöglichkeiten erlauben eine Konditionierung von Ölmenge und -zustand. Zudem lässt sich die Reibung zwischen Kette und Schiene ermitteln. Bild 14 zeigt die hohe Übereinstimmung von Messdaten und Simulationsergebnissen. Damit kann die Methode als prädiktives Werkzeug zur Produktentwicklung eingesetzt werden.

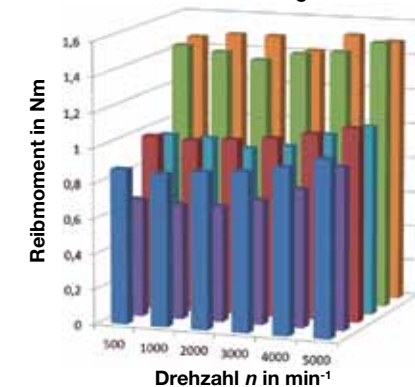
Um die Abhängigkeiten der Reibungszustände zu ermitteln, wird zudem eine hochauflösende Elastohydrodynamik-Simulationstechnik (EHD) eingesetzt. Diese berücksichtigt die elastischen Eigenschaften

Vergleich Messung - Berechnung

Hülseketten mit Führungsschiene



Zahnketten mit Führungsschiene



- Messwert Spannkraft 0,5 kN
- Rechnung Spannkraft 0,5 kN
- Messwert Spannkraft 1 kN
- Rechnung Spannkraft 1 kN
- Messwert Spannkraft 2 kN
- Rechnung Spannkraft 2 kN

Bild 14 Vergleich von Messdaten mit Simulationsergebnissen

der Kontaktpartner in Kombination mit Geometrie, Kontaktkontur, Rauheit, Öleigenschaften und der zeitlich und örtlich veränderlichen Größen Last und Geschwindigkeit. In Bild 15 sind die Modelle zur Ermittlung der tribologischen Systemeigen-

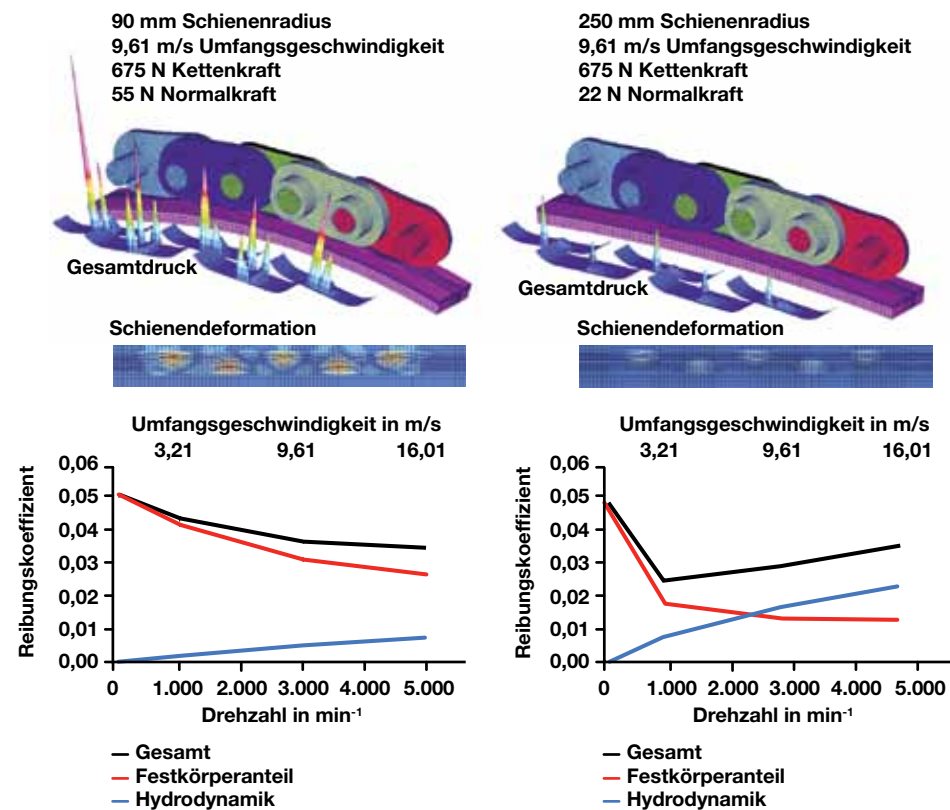


Bild 15 Einfluss des Schienenradius auf die Reibung zwischen Kette und Schiene

schaften des Kontakts Kettenrücken gegen Schiene abgebildet.

Die EHD-Simulationstechnik ist in der Lage, die Anteile der Hydrodynamik und des Festkörperkontakts zu ermitteln. Dadurch ist eine systematische, zielgerichtete Optimierung des Kontakts zwischen Kette und Schiene möglich. So zeigt das Beispiel in Bild 15, dass bei einem Schienenradius von 90 mm der Anteil der Festkörperreibung überwiegt. Der Mischreibungsbereich wird selbst bei hohen Drehzahlen des Systems nie verlassen. Bei größerem Schienenradius nimmt der Anteil der Hydrodynamik zu höheren Drehzahlen deutlich schneller zu. Der Reibwert ist insgesamt deutlich geringer.

Ausblick

Digitale Werkzeuge haben die Planungs- und Entwicklungsprozesse bei Schaeffler erheblich beschleunigt. Der Übergang vom Pilotstadium in eine vielfach gelebte Praxis ist weitgehend abgeschlossen. Nun gilt es, die Werkzeuge nachhaltig in den Organisationsstrukturen zu verankern und bei der bestehenden Vielzahl von digitalen Methoden den Saldo aus Aufwand und Nutzen weiter zu optimieren. Ansatzpunkte dafür sind standardisierte Prozesse, Methoden und IT-Lösungen sowie eine verbesserte Rückkopplung von Produktionsdaten in den Produktentstehungsprozess.

Literatur

- [1] Haas, M.: UniAir – die erste vollvariable elektrohydraulische Ventilsteuerung. 9. Schaeffler Kolloquium, 2010, S. 250-263
- [2] Mayer, A. et al.: Multiphysikalische Simulation eines schnellen Schaltventils für einen elektrohydraulisch vollvariablen Ventiltrieb, 13. MTZ-Fachtagung Virtual Powertrain Creation, 2011
- [3] Kirsten, K.; Brands, C.; Kratzsch, M.; Günther, M.: Selektive Umschaltung des Ventilhubes beim Ottomotor. MTZ 11/2012, S. 834-839
- [4] Schlerege, F. et al.: Optimierung von Steuertriebketten durch erweiterte Reibmodellierung. 5. VDI-Fachtagung Zylinderkopf und Reibung, 2011