

2.2 Methoden der Verhaltensermittlung

Bevor das Verhalten der WZM analysiert und bewertet werden kann, muss es erst einmal ermittelt werden. Bild 2.81 zeigt die prinzipiellen Aspekte der Verhaltensermittlung durch Messung und Berechnung.

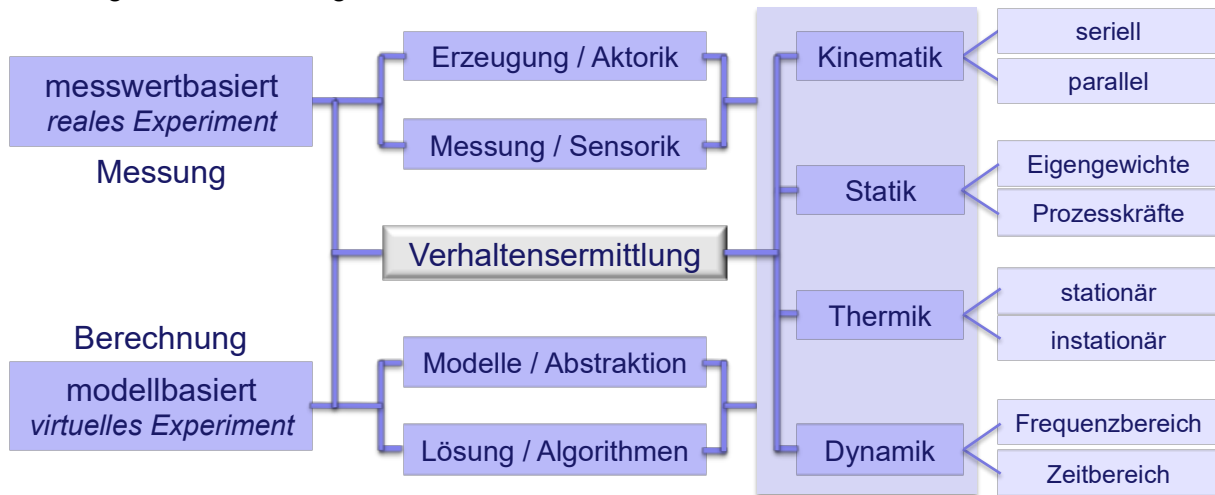


Bild 2.81 Aspekte der Verhaltensermittlung

Nicht nur die Methoden (Messwert- oder Modellbasiert) haben Einfluss auf das generelle Vorgehen zur Ermittlung des Verhaltens bzw. der Eigenschaften an WZM sondern auch die Ziele, die letztlich damit verfolgt werden. Diesbezüglich können zwei unterschiedliche Zielstellungen verfolgt werden, wie aus Bild 2.82 ersichtlich.

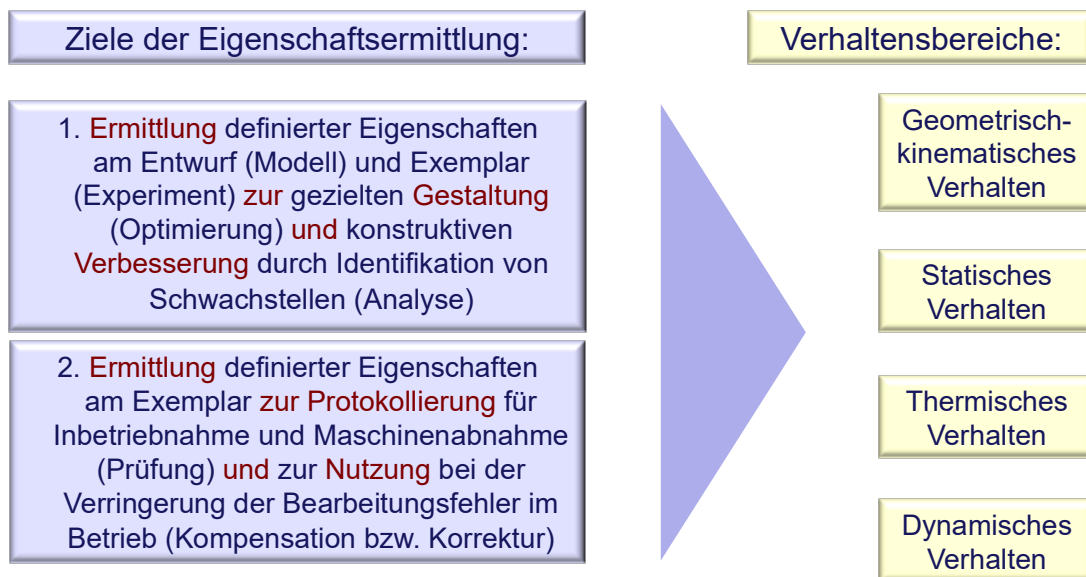


Bild 2.82 Ziele der Eigenschaftsermittlung und Verhaltensbereiche

2.2.1 Verhältnis von Messung und Berechnung

Das Verhältnis von Messung und Berechnung wird häufig dem Verhältnis von Praxis und Theorie gleichgestellt, was problematisch ist, wenn Praxis stillschweigend als „Wahrheit“ angesehen wird. Dann wird jede Abweichung zwischen Messung und Berechnung schnell als Fehler der Berechnung oder des Modells interpretiert. Bild 2.83 provoziert bewusst mit zwei unterschiedlichen Wertungen von Praxis und Theorie. Wir sollten uns auf die Seite von *Lewin* schlagen und für ein Ineinandergreifen von Theorie und Praxis plädieren.



Bild 2.83 Zur Wertung von Praxis und Theorie

Für das Verhältnis von Messung und Berechnung können wir konkrete Aussagen gewinnen, indem wir einerseits die Quellen für Unsicherheiten von Mess- und Berechnungsergebnissen verfolgen und uns andererseits bewusst werden lassen, wovon wir die Ergebnisse ermitteln. Bild 2.84 fasst diese Überlegungen zusammen und stellt Berechnung und Experiment gegenüber.

Auf Seite der Berechnung sind es vor allem die Modellabstraktionen, die Unsicherheiten bergen. Dabei lassen sich beispielsweise die aus der Diskretisierung von Struktur und Parametern ergebenden Unsicherheiten systematisch untersuchen und eingrenzen. Wesentlich kritischer sind im Modell nicht abgebildete – da am Original unerkant gebliebene - verhaltensrelevante Effekte. Vielfach stehen diese unerkannten Effekte mit plötzlichen Qualitätsumschlägen im Verhalten – und damit natürlich mit gravierenden Nichtlinearitäten – im Zusammenhang.

Die Beispiele dafür sind vielgestaltig, sie beginnen mit dem einfachen mechanischen Anschlag, setzen sich fort mit elasto-statischen Stabilitätsproblemen, wie dem Knicken von Balken oder dem Beulen von Wänden, zeigen sich in der dynamischen Instabilität der Selbsterregung oder finden sich im Übergang vom laminaren zum turbulenten Strömungsverhalten. Die Grundcharakteristik der im Zusammenhang mit Berechnungsergebnissen möglichen Auswertungsfehler unterscheidet sich in nichts von den Fehlern, die bei der Verarbeitung und Interpretation von Messergebnissen denkbar sind. Schließlich können auch verfahrensbedingte Berechnungsfehler Einfluss auf die Unsicherheit der Ergebnisse haben. Besonders im Zusammenhang mit der Simulation sind es die sogenannten „klassischen Simulationsdefekte“ – Rundungs-, Diskretisierungs- und Phasenfehler, Diskontinuitätsstellen, Steife Systeme und Simultane Schleifen – , die vermieden werden sollten.

Die Anforderungen, die hinsichtlich Fachkenntnis und Sorgfalt an ein aussagefähiges Messergebnis zu stellen sind, stehen den Ansprüchen an ein brauchbares Berechnungsergebnis nicht nach. So, wie für die Berechnung das Modell über die Aussagequalität des Ergebnisses entscheidet, so bestimmt für die Messung die qualifizierte Gesamtplanung und Durchführung des Experimentes über die Verwendbarkeit der Resultate. Mit Messprinzip, -anordnung und -ablauf sind teilweise vergleichbare Vereinfachungen und Annahmen verbunden, wie bei der Modellabstraktion für die Berechnung. Vielfach werden auch, beispielsweise bei indirekter Messung oder bei bildbasierten optischen Messverfahren, explizit Messmodelle verwendet, für deren Einfluss auf die Unsicherheit des Messergebnisses gelten dann die Aussagen über das Berechnungsmodell analog. Zur Umsetzung eines Messverfahrens ist zumeist eine ganze Messkette erforderlich. In den einzelnen Schritten der, in der Regel notwendigen, Umwandlung unterschiedlicher physikalischer Größen muss je nach Wirk- und Wandlerprinzipien mit diversen Einflüssen gerechnet werden, die sich in der Messunsicher-

heit des Gerätes niederschlagen. Bei mechanischen Messeinrichtungen können dies z.B. Gewichts-, Reibungs- oder Elastizitätswirkungen auf die Messkräfte sein, während für die elektrische Messung nichtelektrischer Größen die diversen Sensoren mit den Nichtlinearitäten ihrer Wandlerkennlinien und den vielfach kaum zu vermeidenden „Querempfindlichkeiten“ für ausreichende Möglichkeiten von gerätebedingten Fehlereinflüssen sorgen. Ähnlich, wie bei der Berechnung die Modellfehler, sind bei der Messung die Messfehler systematisch behandelbar und bei geeignetem methodischen Vorgehen auch eingrenzbar.

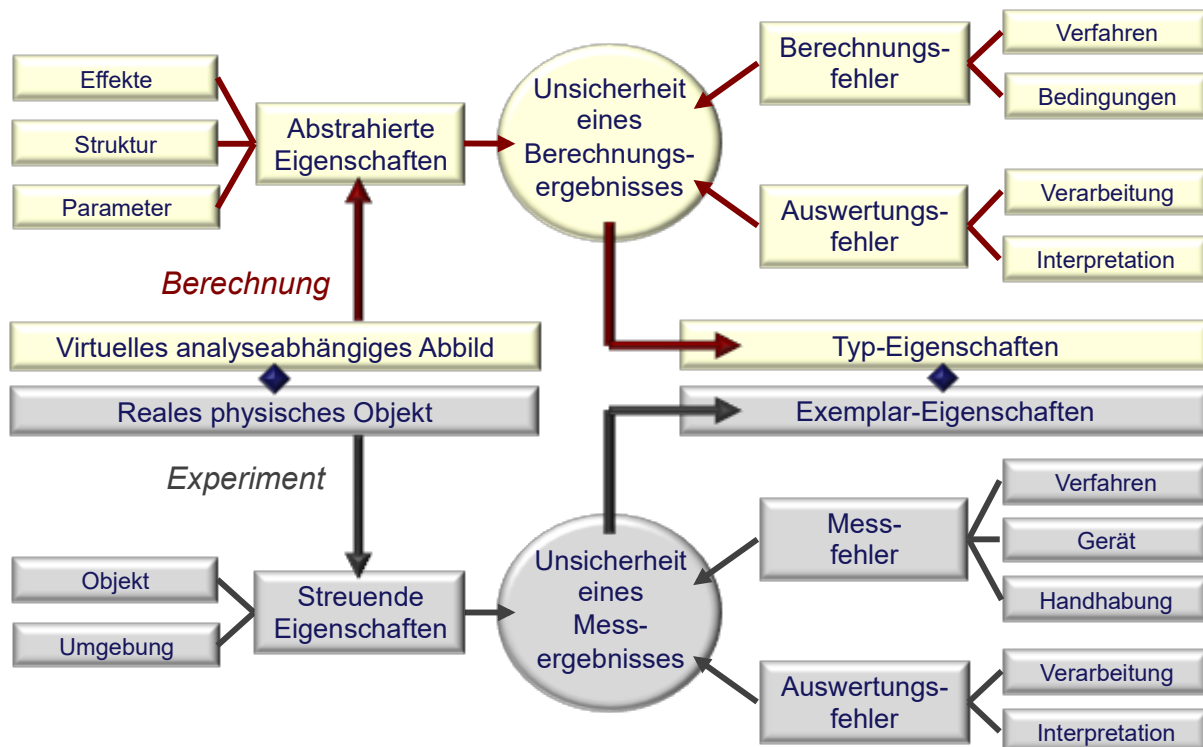


Bild 2.84 Unsicherheiten bei der Berechnung der Typ-Eigenschaften und bei der Messung der Exemplar-Eigenschaften

Wirklich kritisch sind die im Bild 2.84 mit *streuende Eigenschaften* bezeichneten Einflüsse auf die Unsicherheit eines Messergebnisses. Es geht dabei um die - in mehrfacher Hinsicht - „Einmaligkeit“ des Zustandes am Messobjekt im Moment der Messung. Das Exemplarische des Objektes ist in seiner realen und damit einmaligen Ausführung begründet. Unabhängig von den über das Objekt wirkenden Einflüssen der Umgebungs- und Betriebsbedingungen besitzt jede körperliche Objektinstanz „individuelle“ Merkmale, z.B. aus den Material- und Fertigungstoleranzen seiner Bauteile, den speziellen Montagebedingungen oder den konkreten Einstell- und Inbetriebnahmeparametern, bis hin zu „bestätigten“ Bauabweichungen. Das heißt, es existieren praktisch keine zwei - auf denselben Fertigungs-, Montage- und Inbetriebnahmeunterlagen realisierten - verhaltensgleichen Exemplare! Wir müssen uns daher stets bewusst sein, dass eine Messung an *einem* Exemplar zunächst bestenfalls aussagefähig für *dieses* Exemplar ist - jede weiterreichende Aussage bedarf der genaueren Prüfung.

Doch damit nicht genug, neben den im Objekt „installierten“ Parameterstreuungen wird das Ergebnis unserer Messung ganz wesentlich durch die Umgebung beeinflusst. Dieser Einfluss teilt sich sowohl über das Objekt, als auch über die Messeinrichtung mit und ist in den seltensten Fällen wirklich reproduzierbar. Derartige Umgebungseinflüsse können beispielsweise

über Temperatur, mechanische Schwingungen, elektrische sowie magnetische Felder, Feuchtigkeit oder Luftdruck wirken. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Temperatur, da viele der technisch relevanten Parameter temperaturabhängig sind. Beispielsweise können unterschiedliche Temperaturverhältnisse vielfältige Auswirkungen am Objekt besitzen - angefangen von der durch die thermische Dehnung beeinflussten Spiel- oder Vorspannungsänderung in Führungen und Lagerungen bis zur Beeinflussung der Reibungsverhältnisse durch thermisch bedingte Viskositätsänderungen der Schmierstoffe. Ebenso kann die Temperatur aber auch die Elemente der Messkette in ihren sensorischen, übertragenden, wandelnden und verstärkenden Eigenschaften beeinflussen, ganz abgesehen von der thermischen Dehnung der Messgestänge. Schließlich verbleiben die Auswertungsfehler als weitere Möglichkeit, zur Unsicherheit eines Messergebnisses beizutragen. Es handelt sich dabei im wesentlichen um Fehler bei der Verarbeitung und bei der Interpretation der Messergebnisse. Typische Verarbeitungsfehler, die gleichzeitig auch zu eklatanten Fehlinterpretationen führen können, sind z.B. in der Signalanalyse bei Nichtbeachtung des Abtasttheorems möglich. Bei der Interpretation von Frequenzspektren sollte man vorsichtshalber stets die sich rückwärtsdrehenden Speicherräder der Film-Postkutsche vor Augen haben.

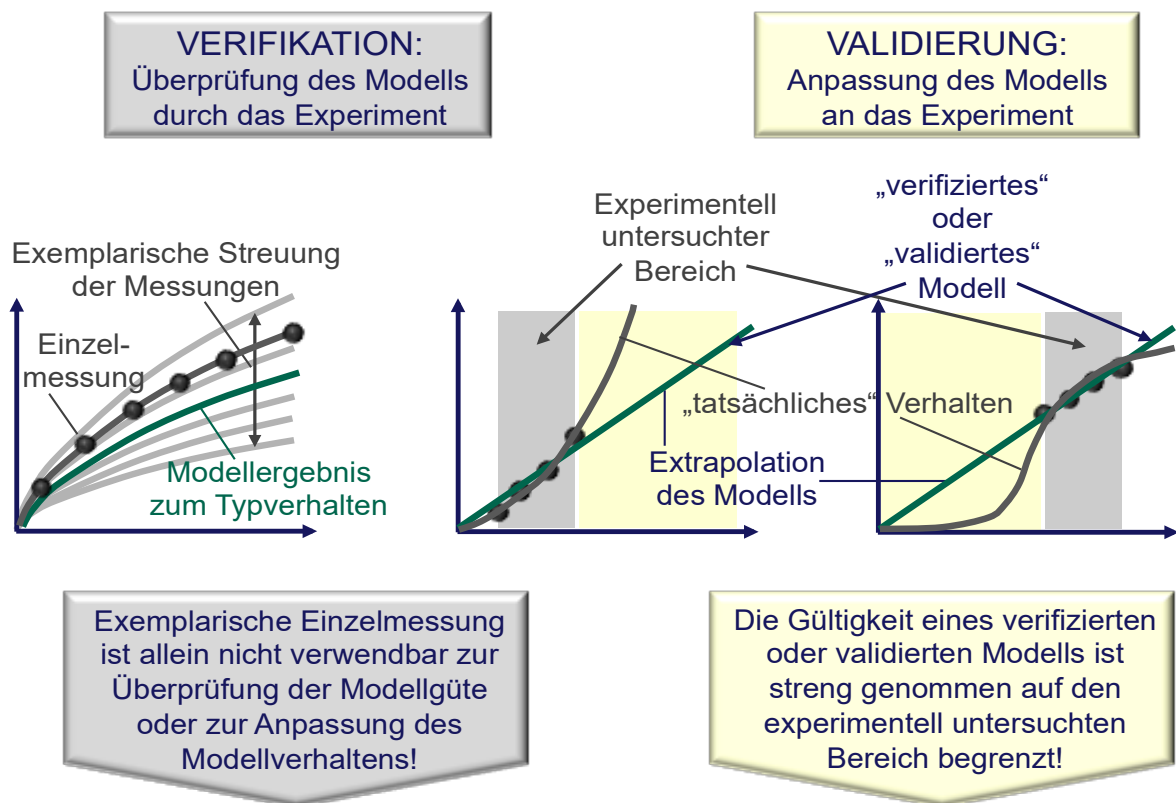


Bild 2.85 Gültigkeit verifizierter und validierter Modelle

Wenn wir zusammenfassen, so müssen wir feststellen: Auch die Wahrheit des Experimentes ist keine absolute. Die Aussagefähigkeit begrenzt sich naturgemäß auf die jeweils konkreten Bedingungen. Sicherer Umgang mit einer experimentellen Anordnung und bewertbare Messergebnisse fordern ebenso ingenieurtechnische Solidität und Kreativität wie Modellentwicklung und Berechnung. Also nicht Rechnen und Simulieren *oder* Messen und experimentieren, sondern zweckmäßiger Umgang mit allen Möglichkeiten. Und da lässt sich nun mal parametrisch in der Simulation die Masse des bewegten Objektes wesentlich leichter verdoppeln oder halbieren als experimentell am realen Objekt. Um aber jedes Missverständnis auszuschließen: Der letzte Prüfstein für jede noch so pfiffige Theorie bleibt die Praxis, so

muss sich auch die Simulation in letzter Instanz an der Effektivitätserhöhung des Produktprozesses messen lassen.

Die Einordnung der experimentellen Verifikation und Validierung soll folgend zumindest hinsichtlich der damit verbundenen Probleme angedeutet werden. Sowohl die Überprüfung des Modells durch das Experiment (Verifikation), als auch die Anpassung des Modells an das Experiment (Validierung) sind im Zusammenhang mit der Systemsimulation nicht als generelle oder umfassende Methoden zu verstehen, sondern lediglich zielgerichtet für - in der Regel recht begrenzte - Teilaufgaben einsetzbar. Es sind wiederum die simulationsrelevanten Nichtlinearitäten im Systemverhalten, welche die Effizienz beziehungsweise Aussagefähigkeit von Validierung und Verifikation unter Umständen stark begrenzen. Die Betonung dieser Begrenzung soll jedoch nicht als Reduzierung der generellen Bedeutung von Validierung und Verifikation für die Verbesserung der Qualität von Simulationsmodellen verstanden werden, sondern auf die erforderliche Sorgfalt im Umgang hinweisen.

Die Anpassung des Modells an das Original soll durch gezielte Parameterveränderungen am Modell erfolgen, indem ein Abgleich zwischen berechnetem und gemessenem Verhalten erfolgt. Dies setzt voraus, dass die das „Abgleichkriterium“ bildenden Verhaltensgrößen signifikant die Parameteranpassung ausweisen und dass mit der Parameteränderung weitere, wesentliche - aber beim Abgleich nicht betrachtete - Verhaltensgrößen hinsichtlich ihrer Abbildungsgüte unbeeinträchtigt bleiben.

Die Aussagefähigkeit eines an experimentelle Ergebnisse angepassten Modells ist streng genommen nur innerhalb des experimentell untersuchten Bereiches und nur für die zum Abgleich herangezogenen Verhaltenskriterien gegeben. Damit ist die Extrapolationsfähigkeit des Modells gegebenenfalls stark begrenzt, das heißt, die Gültigkeit des Modells außerhalb des adaptierten Gebietes ist speziell zu analysieren. Bild 2.85 demonstriert dies schematisch an einfachen Beispielen.

Die Verwendung exemplarischer Einzelmessungen zur Überprüfung der Modellgüte ist kaum aussagefähig. Häufig ist es das Ziel der Modellrechnungen, das - im wahrsten Sinne des Wortes - *typische* Verhalten des zugrundeliegenden Systems zu bewerten.

Das *Typverhalten* teilt sich durch Experimente an einem Objekt jedoch nur in Verbindung mit der Wirkung der mit den Objekt- und Umgebungseinflüssen beschriebenen Verzerrungen im *Exemplarverhalten* mit. Erst wenn die Streuungen der Exemplare eines Typs Berücksichtigung finden, wird eine sinnvolle Verifikation des Modells möglich Bild 2.85. In Analogie zur Gültigkeitsbegrenzung validierter Modelle auf den experimentellen Umfang der Modellanpassung gelten die Verifikationsaussagen streng genommen ebenfalls nur für den Bereich der experimentellen Überprüfung. Darüber hinausgehende Aussagen bedürfen der speziellen Untersuchung.