

Zuverlässigkeitsprognosen von feucht beanspruchten Holzbauteilen durch numerische Simulationen und statistische Methoden – exemplarische Vorgehensweise bei modernen Dach- und Wandkonstruktionen

Dipl.-Ing. Johann W. Herlyn; Dipl.-Ing. Dieter Greubel; Dipl.-Ing. Stephan Schliesing,  
Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut

AIF-Vorhaben-Nr. 13392N

Das Forschungsvorhaben „Zuverlässigkeitsprognosen von feucht beanspruchten Holzbauteilen durch numerische Simulationen und statistische Methoden – exemplarische Vorgehensweise bei modernen Dach- und Wandkonstruktionen“ wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) und den internationalen Verein für Technische Holzfragen (iVTH) gefördert

Holz und Holzwerkstoffe gehören zu den am häufigsten eingesetzten Materialien im Bauwesen. Die Zuverlässigkeit von Holzbauteilen hängt, bei nachgewiesener Tragfähigkeit, in erster Linie vom Feuchteverhalten der Materialien unter Feuchtebeanspruchungen ab, da sich aus dem Feuchteverhalten Gefährdungen durch Dimensionsänderungen oder biologischen Abbau ergeben können. Die Feuchtebeanspruchungen ergeben sich aus den Einbaufeuchten der eingesetzten Materialien sowie aus dem Feuchte-transport innerhalb eines Bauteils und aus der Umgebung in das Bauteil hinein. Das Nachweisverfahren nach DIN 4108-3 berücksichtigt nur die durch Tauwasserausfall bei stationären Klimarandbedingungen entstehende Feuchtezunahme, nicht aber die Feuchtezustände, das Sorptionsverhalten, unterschiedliche Transportmechanismen wie Kapillarleitung und Konvektion sowie bestimmte Klimaparameter wie z. B. Schlagregen und Sonneneinstrahlung. Bei modernen Konstruktionen mit hygroskopischen Dämmstoffen und wasserdampfdiffusionsöffener Bauweise haben die o. g. Parameter jedoch einen bedeutenden Einfluss auf das Feuchteverhalten. Moderne numerische Simulationsprogramme bieten gegenüber dem o. g. Nachweisverfahren die Möglichkeit, alle für das Feuchteverhalten einer Konstruktion relevanten Material- und Klimaparameter in die Betrachtungen einzubeziehen und für Zuverlässigkeitsprognosen die Schwankungsbreite der Parameter zu berücksichtigen.

Das Ziel des Projektes war es, nach praktikablen Möglichkeiten zu suchen, um Zuverlässigkeitsprognosen für moderne Wand- und Dachbauteile aus Holz und Holzwerkstoffen mit Hilfe numerischer Rechenverfahren, Parametervariationen und statistischer Methoden aufzustellen. Im Allgemeinen beruhten die Untersuchungen auf einer Kombination aus experimentellen und rechnerischen Methoden, wobei die experimentellen Untersuchungen vornehmlich der Validierung der Berechnungen dienten.

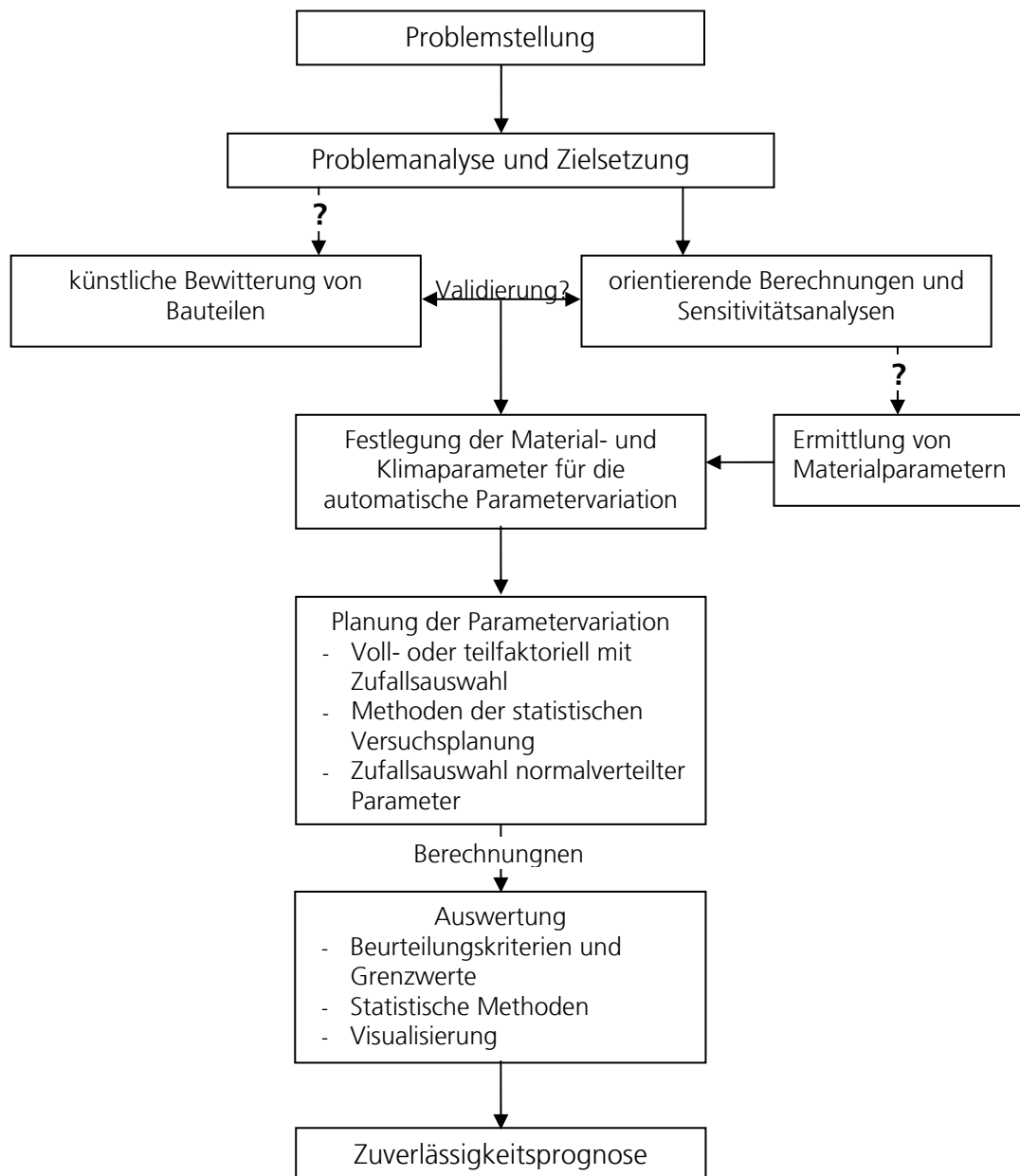
Zur Erreichung des Projektziels wurden umfangreiche numerische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Das für die numerischen Simulationen verwendete

Programm TUN wurde am FhG-WKI entwickelt und im Verlaufe des Projektes stetig verbessert und erweitert. Neu entwickelt wurde ein Programm für das Pre- und Postprocessing, welches die Möglichkeit bietet, alle Funktionen der Simulationssoftware zu steuern und umfangreiche Parametervariationen automatisiert durchzuführen.

Für das Erreichen des Projektziels wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

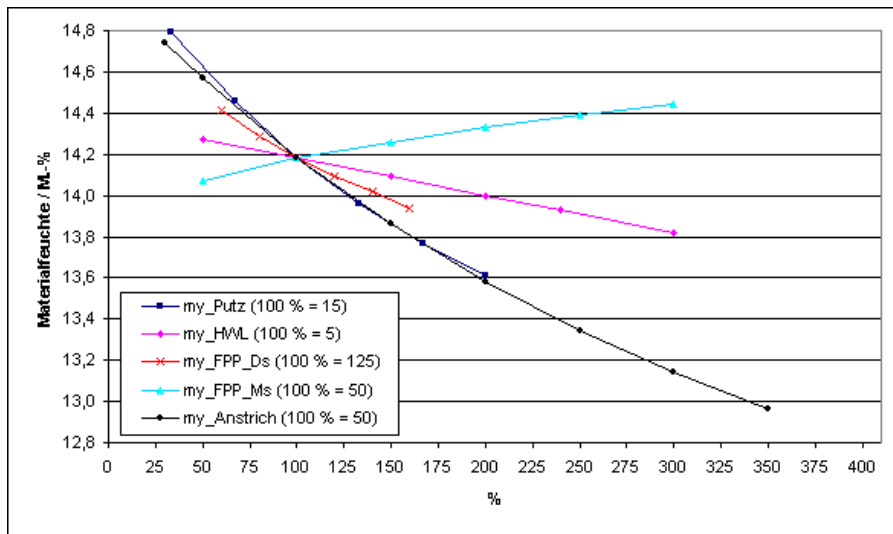
- Künstliche Bewitterung verschiedener Wand- und Dachbauteile in Klimakammern des WKI
- Numerische Simulationen der bewitterten Bauteile und Vergleich von Messwerten und Berechnungsergebnissen
- Verschiedene Verbesserungen am Simulationsprogramm z. B. durch Anpassungen bestehender und die Einführung weiterer Transportmodelle
- Entwicklung eines Tools zur Vereinfachung und Automatisierung der Vorbereitung und Auswertung von Berechnungen
- Untersuchung verschiedener Methoden der Versuchplanung und –auswertung bei der Durchführung umfangreicher Parametervariationen
- Berechnung und Auswertung umfangreicher Parametervariationen
- Entwicklung neuer Visualisierungsmöglichkeiten für Berechnungsergebnisse

Die Abbildung 1 verdeutlicht die Vorgehensweise bei der Planung und Durchführung von Parametervariationen für Zuverlässigkeitsuntersuchungen, wobei die mit Fragezeichen versehenen Abläufe nicht zwingend notwendig sind.



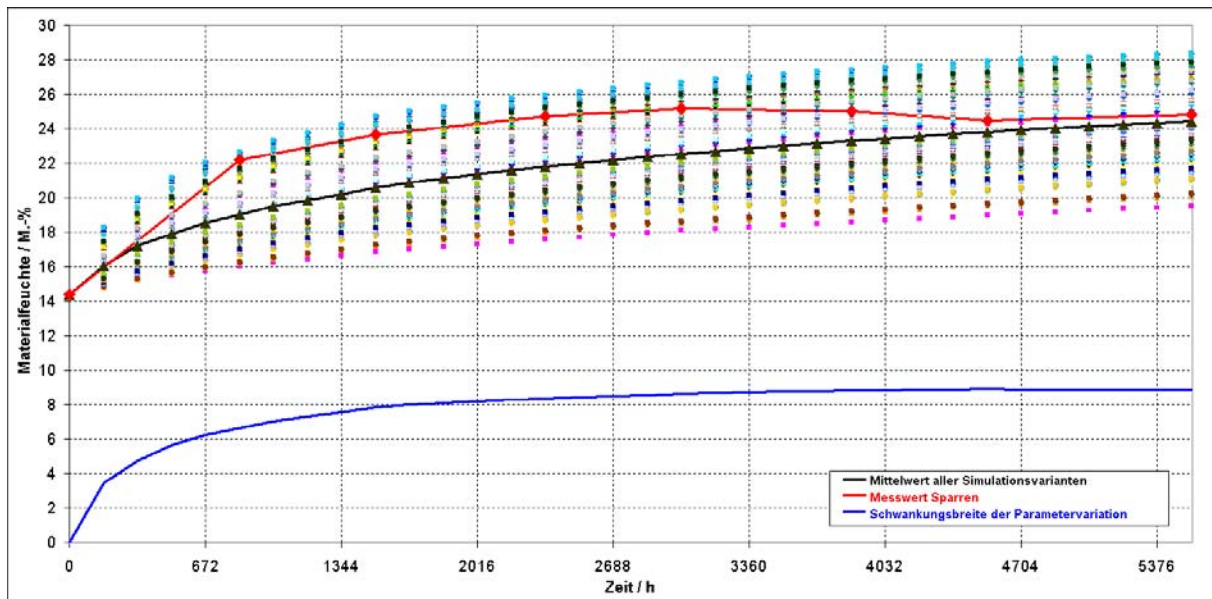
**Abbildung 1: Vereinfachtes Ablaufschema für Zuverlässigkeitsuntersuchungen**

Ein wichtiger Aspekt ist die Kenntnis der für das Feuchteverhalten relevanten Material- und Klimaparameter. Für die Beurteilung des Zusammenhangs zwischen einer Parameteränderung und der Änderung einer Zielgröße werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Die Sensitivitätsanalyse erlaubt nicht nur Aussagen zu den Zusammenhängen zwischen Materialparametern und Zielgrößen sondern auch zu sinnvollen Variationsbereichen der Parameter. Die Abbildung 2 zeigt eine Sensitivitätsanalyse zu den Diffusionswiderständen verschiedener Materialien bzw. Materialschichten in Bezug auf die Materialfeuchte einer Spanplatte in einer Holztafelbauwand. Alle Werte sind auf einen 100%-Wert normiert, der in der Legende mit angegeben ist. Dadurch erlaubt die Darstellung einen direkten Vergleich der unterschiedlichen Parameter und einen Rückschluss auf die tatsächlich eingesetzten Werte. Den größten Einfluss haben in dieser Darstellung die Diffusionswiderstände von Außenanstrich und Putzsystem. Mit steigenden Werten fällt die Feuchtebelastung des betrachteten Bereichs der Spanplatte.

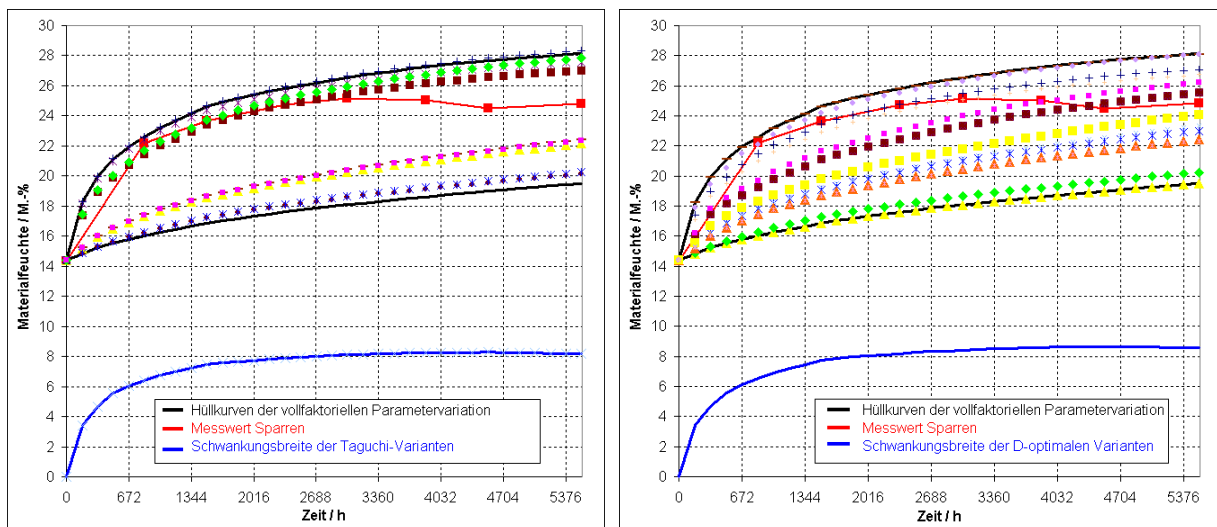


**Abbildung 2: Sensitivität der maximalen Materialeuchte einer Spanplatte in Abhängigkeit von verschiedenen Materialparametern**

Im Anschluss an die Parameteranalysen kann der Umfang der Parametervariationen festgelegt und mit statistischen Methoden geplant werden. Parameter können als diskrete oder normalverteilte Werte vorgegeben werden. Die Normalverteilung entspricht den natürlichen Eigenschaften der Parameter oftmals besser als eine diskrete Verteilung. Da die Anzahl von Parameterkombinationen schon aus rechentechnischen Gründen eingeschränkt werden muss, kann der Variationsraum jedoch nur eingeschränkt untersucht werden. Das heißt, wichtige Kombinationen können unberücksichtigt bleiben. Bei diskreten Parametern dagegen steht die Anzahl der Kombinationen fest; so ergeben sich z. B. bei 5 Parametern in je 5 Stufen  $5^5 = 3125$  Kombinationen. Mit Hilfe statistischer Versuchsplanung kann die Anzahl der zu untersuchenden Kombinationen diskreter Parameter stark reduziert werden. Versuche mit Taguchi- und D-Optimalen Versuchsplänen erbrachten eine gute Abdeckung des Ergebnisraumes. Ein Beispiel zeigen die Abbildungen 3 und 4. Abbildung 3 stellt alle Ergebnisse einer vollfaktoriellen Untersuchung mit insgesamt 136 Berechnungen dar. Zusätzlich sind die Messwerte der experimentellen Untersuchung, der Mittelwert aus allen Berechnungen und die Entwicklung der Schwankungsbreite dargestellt. Zum Vergleich sind in den beiden Diagrammen der Abbildung 4 diejenigen Kombinationen dargestellt, die sich nach Taguchi- und D-optimalen Versuchsplänen ergeben. Dafür müssen nach Taguchiplan 8 und nach D-optimalen Versuchsplan 14 Kombinationen berechnet werden. Die Abbildung der Bereichsgrenzen und der Schwankungsbreite ist mit beiden Versuchsplänen sehr gut. Insgesamt deckt der D-optimale Versuchsplan den Ergebnisraum jedoch besser ab.



**Abbildung 3: Ergebnisse der vollfaktoriellen Parametervariation zum Feuchteverhalten eines Dachsparrens, zusätzlich Messergebnisse, Mittelwert und Schwankungsbreite**



**Abbildung 4: Reduzierung der Parameterkombinationen aus Abbildung 3 mittels statistischer Versuchsplanung nach Taguchi (links) und D-optimalem Versuchsplan (rechts)**

Der Vergleich zwischen Messwerten und Berechnungsergebnissen zeigt, dass keine der Berechnungen die gemessene Feuchteentwicklung des Sparrens korrekt wiedergibt. Dies liegt unter anderem daran, dass nicht alle Gegebenheiten des Experiments numerisch modelliert werden können. So kann z. B. die Anströmung des Versuchsaufbaus in der Klimakammer nur eingeschränkt berücksichtigt werden. Alle Messwerte liegen aber im Ergebnisraum der Parametervariation, die maximale Abweichung zum Mittelwert aller Berechnungen beträgt ca. 3 M.-%. Wie auch in dem hier nicht näher beschriebenen Experiment wäre der Sparren bei den meisten Parameterkombinationen in seiner Dauerhaftigkeit gefährdet.

Die Ergebnisse einzelner Berechnungen können zur Veranschaulichung auch als Animation ausgegeben werden. Diese Animationen bieten die Möglichkeit, das Zeitverhalten von Zustandsgrößen für alle Elemente einer ein- oder zweidimensionalen Berechnung gleichzeitig zu betrachten. Bei eindimensionalen Schnitten ist es dabei auch möglich Extremwerte festzuhalten.

\*\*\*

Die [Animation 1](#) (xx Link) zeigt das Feuchteverhalten einer Holztafelbauwand mit Wärmedämmverbundsystem im zweidimensionalen Querschnitt. Die x- und die y-Achse stellen dabei die Elementierung des Bauteils dar während die z-Achse die Materialfeuchte abbildet. Ebenfalls mit dargestellt ist das Temperaturverhalten und das Simulationsklima. Durch eine Einschränkung des Programms werden alle Elemente äquidistant dargestellt, was zu einer Verzerrung des tatsächlich programmierten Querschnitts führt und beachtet werden muss. Die [Animation 2](#) (xx Link) zeigt die eindimensionale Darstellung eines ähnlichen Bauteils mit Extremwerten.

\*\*\*

Mit den im Verlauf des Projekts entwickelten Mitteln können umfangreiche Parametervariationen fehlerfrei erstellt und durchgeführt werden. Einschränkungen bei der Betrachtung des Variationsraumes bestehen letztlich nur noch durch die vorhandenen bzw. nutzbaren Rechenkapazitäten. Bei der vollfaktoriellen Betrachtung von Parametervariationen ergeben sich große Anzahlen von zu berechnenden Kombinationen. Unterschiedliche Ansätze die notwendigen Berechnungen durch statistische Methoden und Versuchsplanung zu reduzieren, erbrachten gute Ergebnisse. Dadurch ergibt sich wiederum die Möglichkeit, mehr Parameter in die Betrachtungen einzubeziehen.