



PTS-FORSCHUNGSBERICHT IK-MF120081

INTEGRATIVE METHODE FÜR DIE VIRTUELLE PRODUKT- UND PROZESSENTWICKLUNG (PROMETHEUS)

S. Altmann:

Integrative Methode für die virtuelle Produkt- und Prozessentwicklung
(PROMETHEUS)

PTS-Forschungsbericht MF120081

Oktober 2015

Papiertechnische Stiftung (PTS)

Heißstraße 134

D - 80797 München

www.ptspaper.de

Download-Information:

Diese Studie steht auf der Homepage der
PTS zum Download bereit:

www.ptspaper.de/forschungsdatenbank

Ansprechpartner:

Sven Altmann

Tel. (03529) 551-634

Sven.Altmann@ptspaper.de

Papiertechnische Stiftung PTS

Institut für Zellstoff und Papier IZP

Pirnaer Straße 37

01809 Heidenau

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens MF 120081 gewonnen, das im Programm zur "Förderung von Forschung und Entwicklung bei Wachstumsträgern in benachteiligten Regionen" mit finanziellen Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) über den Projektträger EuroNorm Gesellschaft für Qualitätssicherung und Technologie mbH aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert wurde. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Unser Dank gilt außerdem dem Verband der Ostdeutschen Papierfabriken (VOP) für die Unterstützung der Arbeiten.

Titel

Integrative Methode für die virtuelle Produkt- und Prozessentwicklung (PROMETHEUS)

S. Altmann

Inhalt

1	Zusammenfassung	3
2	Abstract	4
3	Einleitung.....	5
4	Material und Methoden.....	6
5	Produktdesignplattform PROMETHEUS.....	8
5.1	Struktur.....	8
5.2	Designflow Materialentwicklung.....	9
5.3	Demonstrator „Virtuelles Produktdesign“	12
	Literaturverzeichnis	14

1 Zusammenfassung

Thema	Entwicklung einer integrativen Methode für die virtuelle Produkt- und Prozessentwicklung
Ziel des Projektes	<p>Ziel des Vorhabens war die Entwicklung einer Methode für den virtuellen Entwurf faserbasierter Produkte und ihrer Herstellungsprozesse.</p> <p>Die Basis dafür sollte durch die Integration von Mess- und Analysetechnik, Pilotanlagen und Simulationen im gesamten Entwicklungszyklus in einer durchgängigen Produktdesignplattform geschaffen werden.</p>
Ergebnisse	<p>Anhand der Analyse der komplexen Anforderungen beim Entwurf von faserbasierten Materialien wurde im Projekt ein innovativer Design-Flow für die Materialentwicklung entworfen, mit geeigneten Software-Werkzeugen instrumentiert und erprobt.</p> <p>Es wurde eine hochflexible, generische Datenbankstruktur zur effizienten Ablage von Materialkennwerten und Prozessparametern entwickelt. Diese Struktur und neu entwickelte Software-Werkzeuge erlauben die nahtlose Integration von Simulationsmodellen und Messeinrichtungen im Produktentwicklungszyklus.</p> <p>Im Ergebnis des Forschungsvorhabens stehen zur Verfügung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Technologie zur Kombination von konventionellen Techniken und Simulationsmodellen im Entwicklungszyklus faserbasierter Produkte • Die Produktdesignplattform PROMETHEUS zur Integration von Pilotanlagen, Laboren, Mess- und Analysetechnik und Simulationen im Produktentwicklungszyklus • Demonstrator „Virtueller Produktentwurf“ zur Vermittlung der modellbasierten Entwurfsmethode auf Basis der Plattform PROMETHEUS
Schlussfolgerung	<p>Im Projekt wurde nachgewiesen, dass mittels der entwickelten Produktdesignplattform PROMETHEUS die durchgängige Integration von Mess- und Analysetechnik, Pilotanlagen und Simulationen im Entwurfsprozess faserbasierter Produkte möglich ist.</p> <p>Mit zunehmender Etablierung von PROMETHEUS in den Entwurfsprozessen der PTS ist von einer erheblichen Effizienzsteigerung bei der Produktentwicklung auszugehen.</p> <p>Die Technologie und die Software-Werkzeuge sind auch geeignet, um die Methode des modellbasierten Entwurfes in der Ausbildung und im Kundenkontakt zu vermitteln.</p> <p>Über die im Projekt geschaffenen Online-Portale haben Kunden und Partner Zugang zu dieser Plattform erhalten und können zukünftig von den bereitzustellenden Materialdaten, Methoden und Online-Werkzeugen profitieren.</p>

2 Abstract

Theme Development of an integrative method for product and process development

Project objective In paper industry, the model-based design is not yet established. The particular challenge in the development of materials is to control the dependencies of macroscopic properties on physical properties of individual fibers and fiber network structures and physical and chemical mechanisms of the micro- and nanoscale. Therefore, it is required to virtually complement the technical possibilities of real systems and equipment by integrating simulations into the tool chain of product development.

Advances in measurement and simulation technology now offer the chance to establish the model-based design in the paper industry. New testing methods provide opportunities for material analysis in micro-and nano-scale structure.

The aim of the project was to develop a method for model based design of fiber-based products and their manufacturing processes by continuous integration of measurement and analysis technology, pilot plant and simulation throughout the entire product development cycle.

Results At the end of the research project the following results are available:

- an universal design flow was developed based on an innovative database concept matching the special requirements in the development cycle of complex fiber-based materials
- the modern platform PROMETHEUS for the integration of pilot plants, laboratories, measuring and analysis technology and simulation in product development cycle was implemented based on State-Of-The-Art web technologies
- a demonstrator "Virtual Product Design" to illustrate the model-based design method by using the product design platform PROMETHEUS

Application/Economic benefits The intended method for model based design offers new and significant opportunities for optimization and development of new fiber-based materials for the PTS and their customers. The PTS serves the entire value chain of paper production. Within the scope of model-based consulting services the new method and the functional tool are offered for an increasingly large customer base of forestry, wood and paper sector. In the medium term, the project results shall be effective in the growing market segment of paper, cardboard and packaging.

Added value for PTS is created by shortened product development cycles (shorter time-to-market), the development of untapped industries and markets with new products and process design, the extension of the PTS consulting and service portfolio, increased quality of advice, the marketing of partial access to the product design platform and new educational products based on product and process engineering simulations.

Paper manufacturers, processors and suppliers benefit from project results due to new products and shorter product development cycles, saving of resources (fibers, additives, energy) and energy, enhanced effectiveness due to significantly higher number of variant tests and reduced trial costs and time, cost and time

savings for the manufacturing industry through papers with optimal processing and machining properties.

Acknowledgement

The research project MF 120081 was funded by the German Federal Ministry of Economic Affairs and Energy BMWi in the programme for the "Promotion of Research, Development and Innovation in disadvantaged areas" based on the decision of the German Parliament and carried out under the umbrella of Euro-Norm in Berlin. We would like to express our warm gratitude for this support.

Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag

We would also like to express our thanks to the involved German association VOP for supporting project performance.

3 Einleitung**Motivation**

Die Papierbranche befindet sich in einem Umbruch und steht vor der Herausforderung, sich mit innovativen Produkten auf einem dynamisierten Markt in immer kürzer werdenden Entwicklungszyklen zu behaupten.

Eine Schlüsseltechnologie dafür ist der aus anderen Branchen bekannte modellbasierte Produkt- und Prozessentwurf, der derzeit für faserbasierte Produkte aufgrund fehlender Integration von konventionellen und modellbasierten Methoden und Werkzeugen nicht umgesetzt wird.

Das Projekt sollte einen Beitrag zur Einführung dieser innovativen Technologie in der Papierbranche leisten.

Ziel des Forschungsprojektes

Ziel war die Entwicklung einer Methode, mit der konventionelle und modellbasierte Methoden im Entwurfsprozess faserbasierter Produkte integriert werden können.

Es sollte ein Werkzeug zur Instrumentierung dieser Methode geschaffen werden, mit dem eine interaktive Zusammenarbeit der Fachdisziplinen im Produktentwicklungszyklus möglich wird und das auch in der Fachkräfteausbildung Einsatz finden kann.

Zum Transfer der für die Entwicklung faserbasierter Produkte notwendigen Informationen zwischen Forschungseinrichtungen und Unternehmen sollten geeignete Schnittstellen zur Verfügung gestellt werden.

Eine der größten Herausforderungen bei der Etablierung neuer Technologien ist die Änderung bzw. der Eingriff in bestehende Abläufe. Im Projekt sollte daher anhand eines Demonstrators gezeigt werden, wie Werkzeug und Methode zielführend im Entwurfsprozess eingesetzt werden können.

Strategisches Ziel

Langfristiges strategisches Ziel der PTS ist der Ausbau der modellbasierten bzw. virtuellen Produkt- und Prozessentwicklung zu einem Schwerpunkt der Forschungen. Zukünftig soll es möglich sein, durch die enge Vernetzung und Interaktion konventioneller Verfahren mit Simulationen die Entwicklung völlig neuer faserbasierter Materialien und ihrer Herstellungsprozesse voranzutreiben.

4 Material und Methoden

Vorgehensweise im Überblick

Die Bearbeitung des Projektes erfolgte in 3 Phasen:

Phase 1: Entwicklung des Design-Flow für den Materialentwurf auf Grundlage eines zur zentralen Ablage von Produkt- und Prozessparametern und Kontextinformationen geeigneten Datenmodells.

Phase 2: Spezifikation, Implementierung und Test des Basissystems der Produktdesignplattform sowie von Benutzer- und Datenschnittstellen und Recherche- und Reportfunktionalität.

Phase 3: Validierung des Design-Flow und der Produktdesignplattform anhand des Demonstrators „Virtuelles Produktdesign“ und Erstellung der Systemdokumentation.

**Phase 1:
Grundlagen und
Methodenentwicklung**

In den Arbeitspaketen (AP) 1 bis 5 wurde ein auf den Entwurf von faserbasierten Materialien im industrienahen Umfeld zugeschnittener Design-Flow entwickelt. Eine besondere Herausforderung war dabei, die enorme Vielfalt der eingesetzten Materialien und der daraus resultierenden Menge der Material- und Prozessparameter, die zudem in verschiedenen Kontexten der Materialentwicklung genutzt und miteinander verknüpft werden, zu berücksichtigen und durch ein geeignetes Datenmodell zu unterstützen .

Zunächst erfolgte dazu eine umfassende Bestandsaufnahme von Produkt-, Prozess- und Modellparametern sowie Kontextinformationen und deren Abhängigkeiten. Dazu wurden repräsentative Aggregate der Stoffaufbereitung, die Versuchspapiermaschine, Mess- und Prüfgeräte und Simulationsmodelle betrachtet. Zur Darstellung der Abhängigkeiten wurden bereits in dieser Phase Entity-Relationship-Diagramme (ERD) eingesetzt, die als Grundlage für das zu entwickelnde Datenmodell dienen.

Im Hinblick auf die Praxistauglichkeit der zu entwickelnden Plattform wurden für die Korrelationsanalyse der Produkt- und Prozessparameter exemplarisch Parameter von handelsüblichen Faltschachtelkartons betrachtet. Dazu wurden u.a. die im Rahmen des Vorlaufforschungsprojektes „IK-VF 120017 Materialparameter“ gewonnenen Ergebnisse herangezogen.

**Phase 2:
Entwicklung
Produktdesignplattform**

Phase 2 entsprach den AP 6 bis 8, in denen die Spezifikation und rechen-technische Implementierung der Produktdesignplattform erfolgten. Als Name für die Plattform wurde synonym zum Projekt der Name PROMETHEUS vergeben.

Die Spezifikation und Darstellung der logischen Verknüpfungen innerhalb der Datenbank erfolgte mittels ERD und ist unabhängig von der Implementierung auf einem bestimmten Datenbank-System. Zur Erstellung der ERDs wurde das Tool EnterpriseArchitect von Sparx-Software genutzt.

Die Nutzerschnittstellen (GUI) für das PROMETHEUS-System wurden in den Sprachen PHP und HTML5 implementiert. Durch die Verwendung von browserbasierten GUIs wurde ein äußerst flexibles und wartungsfreundliches System geschaffen. Die GUIs sind intern via Intranet und extern via Internet nutzbar.

Es wurde ein Portal für den VOP im Intranet der PTS und ein offenes Online-Portal auf der Internet-Präsenz der PTS implementiert, auf dem Kunden und Partner im Datenbestand von PROMETHEUS zu Methoden der Materialentwicklung recherchieren können (<http://www.ptspaper.de/produkte/prometheus>).

**Phase 3:
Anwendung und
Dokumentation**

In den AP 9 und 10 wurde mit dem neu entwickelten PROMETHEUS ein Demonstrator aufgebaut, mit dem die Kombination von Simulationsmodellen und konventionellen Techniken im Produktentwicklungszyklus gezeigt wird.

Es entstand ein intuitiv zu bedienendes Werkzeug zum Aufbau von Entwicklungslinien in der Materialentwicklung, Die damit zu praktizierende Vorgehens- und Denkweise dient als Leitfaden für die modellbasierte Entwicklung.

Im Zuge der Arbeiten wurden Nachbesserung in der Implementation des Basissystems und der Benutzerschnittstellen vorgenommen. Für die Erstellung der Software-Dokumentation wurde u.a. das Tool DoxyGen eingesetzt.

Auf Basis der PROMETHEUS-Technologie betreibt die PTS mittlerweile ein weiteres Online-Portal für modellbasierte Entwicklungen. Das Werkzeug „Gebrauchswertrechner“ (<http://www.ptspaper.de/pfr-calculator>) gestattet Berechnungen zur Bestimmung des papiertechnologischen Gebrauchswertes von Altpapier. Die Kenngrößen der dort betrachteten Materialien sind ebenfalls in der PROMETHEUS-Datenbank abgelegt.

5 Produktdesignplattform PROMETHEUS

5.1 Struktur

**Grundlegende
Struktur**

Ausgehend von der Analyse der Datenaufkommen und Nutzerprofile wurde der in der folgenden Abbildung skizzierte strukturelle Aufbau von PROMETHEUS entwickelt.

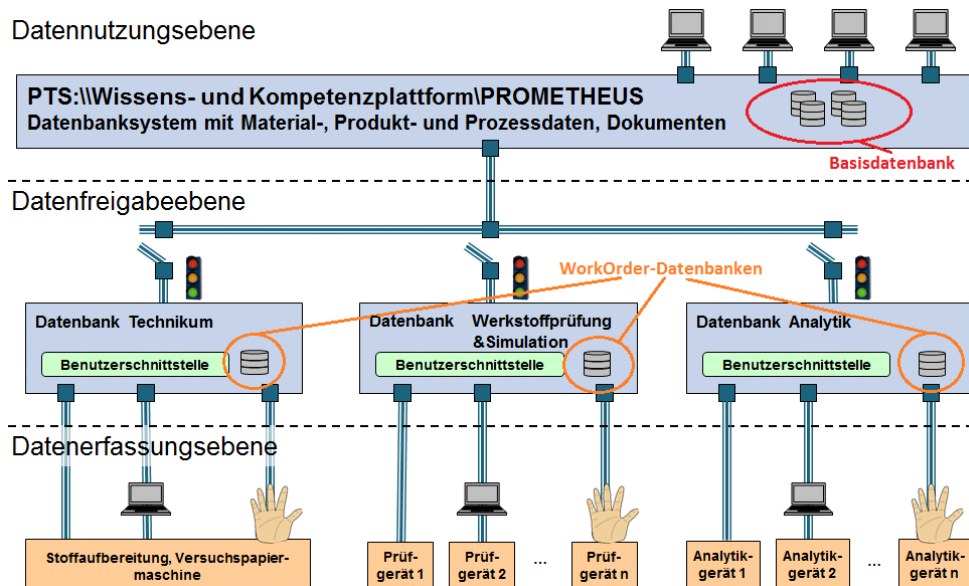


Abbildung 1: Struktur der Plattform PROMETHEUS

- Logische Ebenen** PROMETHEUS besteht aus den logischen Ebenen:
- Datenerfassungsebene
 - Datenerfassung über Geräte-spezifische Schnittstellen für die heterogene und gering automatisierte Mess-Umgebung der PTS; i.d.R. erfolgt dort bereits eine Nachbearbeitung und Komprimierung der Messergebnisse
 - Datenfreigabeebene
 - Bewertung der lokalen Messergebnisse und Verwerfen von Fehlversuchen und Ausreißern
 - Freigabe und Übertragung valider Messergebnisse in die PROMETHEUS-Basisdatenbank
 - Datennutzungsebene
 - Auswertung und Weiterverarbeitung valider Messergebnisse aus zentraler PROMETHEUS-Basisdatenbank in verschiedenen internen und externen Workflows
-

Datenbank-Verbund

Zentrale Datenquelle der Plattform ist die PROMETHEUS-Basisdatenbank – ein persistentes Datenbanksystem, in dem Material-, Produkt- und Prozessdaten und Verweise auf Dokumente abgelegt sind. Dokumente werden separat in geschützten Bereichen auf dem PROMETHEUS-Server abgelegt.

Die Ablage der lokalen Messergebnisse erfolgt in lokalen, volatilen s.g. *WorkOrder*-Datenbanken auf lokalen Servern in den Fachbereichen der PTS.

Nach Sichtung und expliziter Freigabe werden die Messergebnisse von den lokalen WorkOrder-Datenbanken in die zentrale PROMETHEUS-Basisdatenbank verschoben.

5.2 Designflow Materialentwicklung

- Anforderung** In einem zentralen Design-Flow sollten konventionelle Versuche und Simulationen gleichwertig betrachtet werden und im Produktentwicklungsprozess modular und wechselseitig eingesetzt werden können. Im Folgenden wird das Konzept zur Umsetzung dieser Anforderung in PROMETHEUS erläutert.

Definitionen & Festlegungen

Ein **Workflow** bildet eine bestimmte Vorgehensweise bzw. einen Ablauf im Produktentwicklungsprozess ab.

Eine **View** ist eine spezifische Bedienoberfläche = Nutzerinterface incl. impliziter Suchabfragen mit geordneter Bereitstellung entsprechender Datensätze.

Views können in mehreren Workflows genutzt werden.

Eine **Methode** ist ein Algorithmus zur Ermittlung bzw. Veränderung von physikalischen Kenngrößen = Parametern eines bestimmten Materials. Eine Methode repräsentiert entweder eine konventionelle Technik oder ein Simulationsmodell.

Ein **Versuch** ist die Anwendung einer Methode mit bestimmten Methodenparametern auf ein Material zum Zweck der Ermittlung bzw. Veränderung von Materialparametern.

Jede Veränderung eines Materialparameters durch die Anwendung einer Methode ist gleichbedeutend mit der Erzeugung eines neuen Materials. Es ist unerheblich, ob ein Materialparameter durch einen konventionellen Versuch oder ein Simulationsexperiment ermittelt oder verändert wurde.

Singuläre Ressource Materialparameter

Materialparameter werden redundanzfrei entsprechend ihres Typs (z.B. Fasermorphologie, mechanische/optische Parameter, ...) in Datentabellen abgelegt.

Alle Materialparameter werden unabhängig von ihrer tatsächlichen, über mehrere Tabellen verteilten, physischen Ablage in der Datenbank als ein logisch zusammenhängender Vektor betrachtet und ausgewertet.

Alle, in verschiedenen Workflows eingesetzten, Methoden greifen ohne Einschränkung auf dieselben zentralen Materialeigenschaften zu.

Zentraler Workflow Materialentwicklung

Der auf den o.g. Festlegungen basierende neu entwickelte **zentrale** Work- bzw. Design-Flow „*Materialentwicklung*“ realisiert eine Material- = Produkt-spezifische Verknüpfung von im Produktentwicklungszyklus angewendeten Methoden mit Materialeigenschaften.

Der Design-Flow Materialentwicklung bildet die sequentiell auf ein Material angewendeten Methoden = Modifikationsstufen ab, die zu einer Bestimmung bzw. Veränderung der Materialparameter führen.

Nach jeder Modifikationsstufe entsteht damit in PROMETHEUS analog der Realität ein neues Material = ein neuer Datensatz an Materialparametern. Wird eine Simulationsmethode parallel zu einer konventionellen Methoden angewendet, entsteht neben dem Datensatz der realen Materialparameter ein Datensatz des virtuellen Materials.

Entsprechend des verwendeten Datenmodells wird in der Datenbank jedes Material und jede Methode als separater Datensatz abgelegt und kann beliebig in anderen Materialentwicklungsflows verwendet werden.

Jedes Material ist mit der vorhergehenden und nachfolgenden Modifikationsstufe = Methode und mittelbar damit auch mit dem wiederum daraus resultierenden Material verknüpft. Über diese Verknüpfung lassen sich alle Entwicklungsstufen der Materialentwicklung nachvollziehen, bewerten und optimieren.

Integration von Simulationsmodellen

Die folgende Darstellung veranschaulicht:

- die Änderung von Materialparametern und damit die Erzeugung von neuen Materialien durch die Anwendung von Methoden
- den wechselweisen Zugriff von konventionellen und virtuellen Methoden (Simulationen) auf zentrale Material- und Methodenparameter

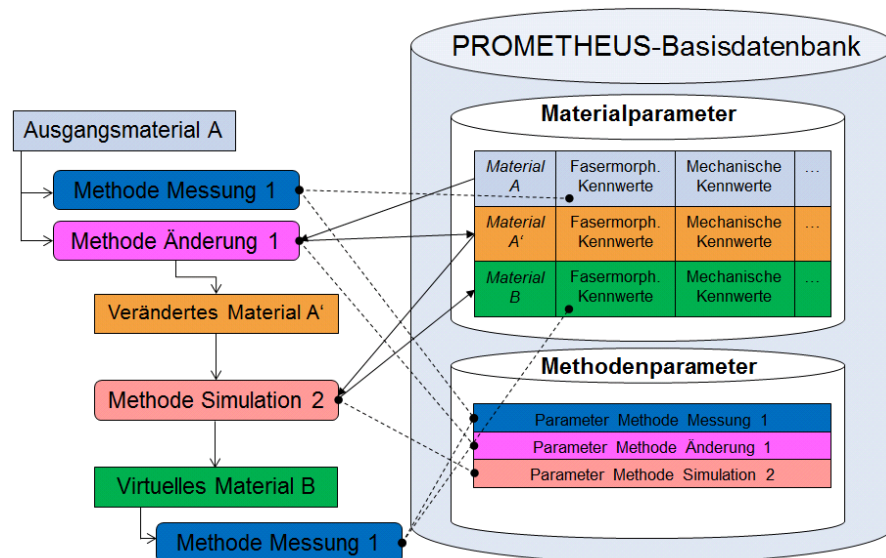


Abbildung 2: Materialentwicklungsprozess

Ergebnis

Der zentrale Design-Flow Materialentwicklung vereint alle Methoden und Materialien und definiert eine stringente Material-orientierte Vorgehensweise. Über die Grenzen der Fachdisziplinen hinaus wird damit die konsistente Verwendung von Parametern, Mess-, Versuchs- und Simulationsergebnissen und Kontextinformationen im gesamten Entwurfsprozess sichergestellt.

Mit dieser Methode und den mit dem zugrundeliegenden Datenmodell realisierten dynamischen Verknüpfungen singulärer Datensätze wird die Kombination konventioneller und Simulationstechniken und die iterative Weiterverwendung von Versuchs- und Simulationsergebnissen über die gesamte Werkzeugkette gewährleistet.

Für repräsentative Abläufe im Umfeld der Produktentwicklung wurden die Workflows *Versuch/Versuchsplanung*, *F&E-Projekt* und *Recherche* entwickelt, die sich nahtlos in den zentralen Design-Flow Materialentwicklung integrieren.

Die spezifizierten Abläufe sind konform mit den Anforderungen an das Qualitätsmanagement der PTS.

Die Zugriffe interner und externer Anwender erfolgen über browserbasierte Nutzerinterfaces und werden über ein Rechtesystem geregelt.

5.3 Demonstrator „Virtuelles Produktdesign“

Demonstrator Virtuelles Produktdesign

Mit der Anwendung der im Design-Flow „Materialentwicklung“ manifestierten Methode und dem zentralen Werkzeug „Materialflow-Explorer“ wurde prototypisch gezeigt, wie durch die Kombination von Simulationen und konventionellen Techniken ein optimiertes Produkt entwickelt werden kann.

Iterative Modifikation

Es wurden folgende wesentliche Schritte abgearbeitet:

Iterationsstufe 1: Aufbau Referenzsystem

1. Festlegung der Zieleigenschaft Biegesteifigkeit
2. Biegesteifigkeitsprüfung des Referenzmaterials
3. Selektion der an der Optimierung beteiligten Disziplinen
 - Pilotanlage: Mahlaggregat, Mischbütte, Papiermaschine, Flächenmassemesssystem
 - Werkstoffprüfung: Fasermess-System FiberLab, Biegesteifigkeitsprüfgerät
4. Auswahl des Modells und relevanter Produkt- und Prozessparameter
 - Datenbasierte Modelle: Mahlung, Mischung, virtuelle Fraktionierung, Blattbildung, Biegesteifigkeit
 - Parameter: u.a. Mahlergie, mittlere Faserlänge, Flächenmasse, Lagendicke
5. Aufbau des Materialflow „Demonstrator Faltschachtelkarton“ im Materialflow-Explorer – siehe Abbildung 3.
 - Einstellung der Versuchsparameter über die PROMETHEUS-Schnittstellen = Vorgabe des Versuchsplan
6. Durchführung der konventionellen Versuche in Pilotanlage, Labor und Werkstoffprüfung entsprechend des Versuchsplan aus PROMETHEUS
 - Mahlung, Mischung, Flächenmassemessung, FiberLab-Messung, mehrlagige Bahnbildung auf der Versuchspapiermaschine

Iterationsstufe 2: Iterative Modifikation des Versuchsraums

1. Erweiterung des Materialflow „Faltschachtelkarton“ im Werkzeug Materialflow-Explorer mit den virtuellen Versuchen = Modellen:
 - „Virtuelle Mahlung“, „Virtuelle Mischung“, „Virtuelle Blattbildung“, „Simulation Biegesteifigkeit“
2. Parametrierung der Simulationsmodelle mit anhand von Erfahrungswerten optimierten (Modell-)Prozessparametern
3. Durchführung der Simulationen der o.g. virtuellen Versuche
4. Berechnung (Simulation) der Zieleigenschaft Biegesteifigkeit

Iterationsstufe 3: Realisierung des optimierten Produktdesigns anhand der Simulationsergebnisse

1. Modifizierung der Prozessparameter der konventionellen Versuche im Materialflow „Faltschachtelkarton“
 - die in Iterationsstufe 2 bestimmten Modell-Parameter werden auf die Parameter der konventionellen Versuche übertragen = Erstellung eines modifizierten Versuchsplan
2. Durchführung der konventionellen Versuche in Pilotanlage, Labor und Werkstoffprüfung entsprechend des modifizierten Versuchsplan
 - Mahlung, Mischung, mehrlagige Bahnbildung
3. Biegesteifigkeitsprüfung des modifizierten Materials

Materialflow „Demonstrator Faltschachtelkarton“ im Werkzeug Materialflow-Explorer

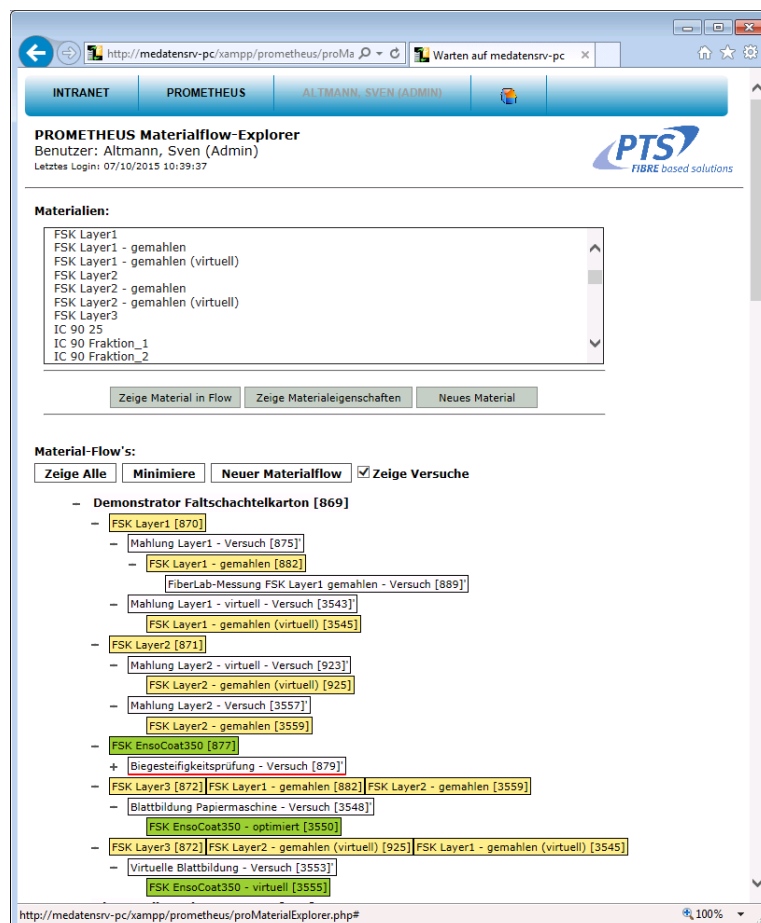


Abbildung 3: Demonstrator Faltschachtelkarton im Materialflow-Explorer

Bewertung und Ausblick

Der Demonstrator stellt die Tragfähigkeit und Praxistauglichkeit des gewählten Ansatzes der modellbasierten Entwicklung unter Beweis. Mit den entwickelten Vorgehensweisen und Werkzeugen ist es möglich, konventionelle und virtuelle Methoden im Produktentwicklungszyklus zu kombinieren.

Literaturverzeichnis

The Forest Fibre Industry: 2050 Roadmap to a low-carbon bio-economy.
CEPI, 2011

An integrated manufacturing system for rapid tooling based on rapid prototyping.
Yucheng Ding, Hongbo Lan, Jun Hong, Dianliang Wu Robotics and Computer-Integrated
Manufacturing, Volume 20, Issue 4, August 2004, Pages 281-288

Virtual Prototyping Pays Off.
Dan LaCourse, Cadalyst Magazine. May, 2003

Recent Integration Achievements in Virtual Prototyping for the Automobile Industry.
Fouad El Khaldi, Raymond Ni, Pierre Culiere, Peter Ullrich, Carlos Terres Aboitiz, 2010, FISITA.

A virtual injection molding system based on numerical simulation.
Huamin Zhou, Songxin Shi und Bin Ma, The International Journal of Advanced Manufacturing
Technology Volume 40, Numbers 3-4 (2009), 297-306

Qualitätssicherung bei Multilayern, im Besonderen bei beschichteten Papierprodukten, mittels neuer
Terahertz-Messtechnik.
G. Gärtner, P. Plew, Österreichische Papierfachtagung, Graz, 23.-24.5.2012

Characterization of 3D fibrous media with geodesic methods.
V. Morard, E. Decencière, P. Dokladal, 3D Microstructure Meeting Saarbrücken, Germany,
November 2nd – 4th, 2011

Multi-Scale Simulation of Paperboard Edge Wicking Using a Fiber-Resolving Virtual Paper Model.
A. Mark, R. Sandboge, A. Berce, F. Edelvik, E. Glatt, S. Rief, A. Wiegmann, M. Fredlund, J. Amini, R.
Lai, L. Martinsson, U. Nymann, J. Tryding, Progress in Paper Physics Seminar 2011, Graz

Microstructure Simulation of Early Paper Forming Using Immersed Boundary Methods.
A. Mark, E. Svenning, R. Rundqvist, F. Edelvik, E. Glatt, S. Rief, A. Wiegmann, M. Fredlund, R. Lai,
L. Martinsson and U. Nymann, Progress in Paper Physics Seminar 2011, Graz

Numerical simulation of tensile testing using stochastically produced fibre networks of paper.
Matheas, J., Erdt, M., Altmann, S., Progress in Paper Physics Seminar 2011, Ed.: U. Hirn, Verlag der
Technischen Universität Graz, Graz, 2011, S. 367-368 (ISBN 978-3-85125-163-0)

MySQL ReferenceManual, <http://dev.mysql.com/doc/refman/5.6/en/>

WIAM-Nutzerhandbuch, IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH

www.ptspaper.de

Papiertechnische Stiftung

Heßstraße 134 · 80797 München · Telefon +49 (0)89-12146-0 · Telefax +49 (0)89-12146-36 · Mail info@ptspaper.de

Pirnaer Straße 37 · 01809 Heidenau · Telefon +49 (0)3529-551-60 · Telefax +49 (0)3529-551-899 · Mail info@ptspaper.de