

Fachaufsatz, erschienen in:

Konstruktion – Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe

Jahrgang 63 (2011), Heft 3, Seiten 67-70

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. Werner Hufenbach

Dr.-Ing. Olaf Helms

Dipl.-Ing. Florian Lenz

Dipl.-Ing. Christian Garthaus

Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU Dresden

Holbeinstr. 3, 01307 Dresden,

Tel.: 0351 463 38142, Fax: 0351 463 38143, E-Mail: ilk@ilk.mw.tu-dresden.de

## Methodische Leichtbau-Konstruktion am Beispiel eines Transportfahrrads

*Demonstration of a methodical lightweight design process using the example of a transport bicycle*

Chancen für neue Produkte ergeben sich oft aus einem günstigen zeitlichen Zusammentreffen von technischem Fortschritt und veränderten Nachfragetrends. So etwa bieten auch Neuerungen bei Werkstoffen, Antriebssystemen und Fertigungsverfahren vor dem Hintergrund eines steigenden Bedarfs an energieeffizienten Transportmitteln interessante Rahmenbedingungen zur Entwicklung von neuartigen Lastenfahrrädern.

*Chances for new products often occur due to coincidence of technical progress and changing market trends. So the increasing need for energy efficient transport solutions combined with improvements in the fields of materials, drive systems and manufacturing processes provides interesting conditions for the development of novel transport bicycles.*

### Einleitung

Zur Realisierung von besonders energieeffizienten und dabei relativ leistungsstarken Transportsystemen wird vor allem durch innovative Leichtbaulösungen beigetragen. Wettbewerbsfähige Leichtbauprodukte sind durch einen stimmigen Kanon aus funktionalen, strukturmechanischen sowie werkstoff- und herstellungstechnischen Einzellösungen gekennzeichnet. Um eine derart stimmige Leichtbaukonstruktion zu erzielen, kommen leichtbauspezifische Konstruktionsmethoden zur Anwendung, die am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der TU Dresden im Rahmen von grundlegenden und anwendungsnahen Forschungsprojekten erarbeitet und eingesetzt werden. Hierzu zählen neben den Möglichkeiten des Stoff- und Gestaltleichtbaus vor allem die tragwerksbezogene Bauteilsynthese und die methodische Konzeption von Mischbauweisen [1]. Die Anwendung dieser Konstruktionsmethoden lässt sich anschaulich am Beispiel eines neuartigen Leichtbau-Lastenfahrrads erläutern.

### Definieren von Entwicklungszielen

Entwicklungsziele ergeben sich häufig aus der ökonomischen Notwendigkeit, die Attraktivität oder den Wert eines bestehenden Systems zu steigern oder den Herstellungsaufwand zu reduzieren. Bei verkehrstechnischen Systemen sind diese Wertsteigerungen z. B. durch höhere Leichtbaugrade, energieeffizientere Antriebssysteme, höhere Transportleistungen, Design-Variationen oder

prozesstechnische Optimierungen zu erreichen. Dabei bleiben die grundlegenden Fahrzeugkonzepte weitgehend erhalten, weshalb derartige Entwicklungen weniger als Neukonstruktionen sondern vielmehr als umfangreiche Anpassungskonstruktionen zu benennen sind.

Auch die Entwicklung des Leichtbau-Transportfahrrads lässt sich als eine derartige Anpassungskonstruktion darstellen, wobei klassische Konstruktionen wie z. B. das Modell „Long John“ des dänischen Herstellers Smith & Co. als Ausgangspunkt dienen (Bild 1).



**Bild 1:** In Dänemark entwickelter und im Jahr 1930 eingeführter Transportfahrrad-Typ „Long John“

In früheren Jahrzehnten kamen Transportfahrräder vor allem in nordeuropäischen Ortschaften und Dörfern für kleingewerbliche Transportaufgaben zum Einsatz. Gegenwärtig zeichnet sich ein kleiner aber wachsender Markt für Privat- und Freizeitanwendungen ab, wobei dieser Trend mit dem steigenden gesellschaftlichen Interesse an Freiluftaktivitäten und ökologischer Nachhaltigkeit im Einklang steht. In diesem Markt ist auch das geplante Transportfahrrad anzusiedeln, so dass als erstes Entwicklungsziel ein sportlich-ansprechendes Design mit hohem „Life-Style-Faktor“ zu nennen ist.

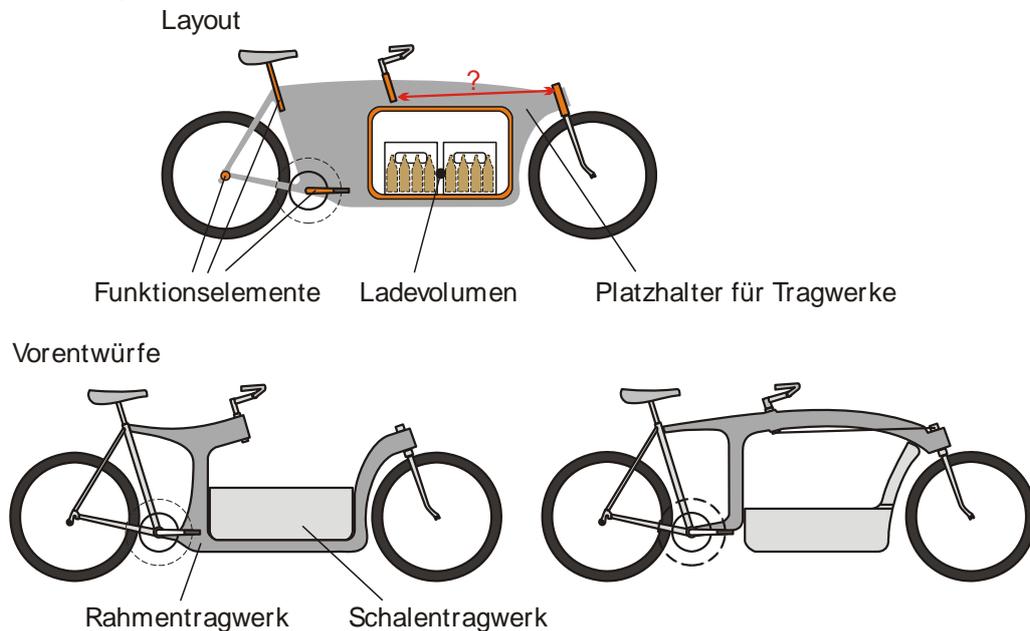
Passend zur sportlichen Anmutung sind ferner die Fahreigenschaften nutzerspezifisch einzustellen. Da dreirädrige Konzepte einer dynamischen Kurvenfahrt entgegenstehen, werden zweirädrige Lösungen fokussiert. Durch einen angemessenen Leichtbaugrad sollen dem Anwender Gefühle von unnötiger Mühe und Trägheit erspart bleiben. Um ein hohes Maß an Fahrstabilität zu erreichen und um kräftige Antritte effizient in Vortrieb zu verwandeln, ist dabei eine möglichst steife Rahmenstruktur zu realisieren. Eine tiefe Ladefläche soll zudem eine angenehme Handhabbarkeit auch bei größeren Lasten ermöglichen. Mit einem robusten Aufbau muss ferner dem Sinn des zuverlässigen „Arbeitstiers“ Rechnung getragen werden. Durch eine weitreichende Kompatibilität mit gängigen Antriebs- und Schaltungskomponenten etwa aus dem Mountainbike-Bereich sind außerdem hochwertige und individuelle Ausstattungen zu ermöglichen.

Die reproduzierbare Fertigung in kleiner Serie soll durch eine effiziente Mischbauweise aus metallischen Modulen sowie beanspruchungs- und werkstoffgerechten Strukturen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) gewährleistet werden. Im Rahmen des Entwicklungsprozesses sind somit vorteilhafte Kompromisse zwischen Robustheit, einfacher Herstellbarkeit und hohem Leichtbaugrad zu realisieren.

### **Konzipieren eines mechanischen Systems**

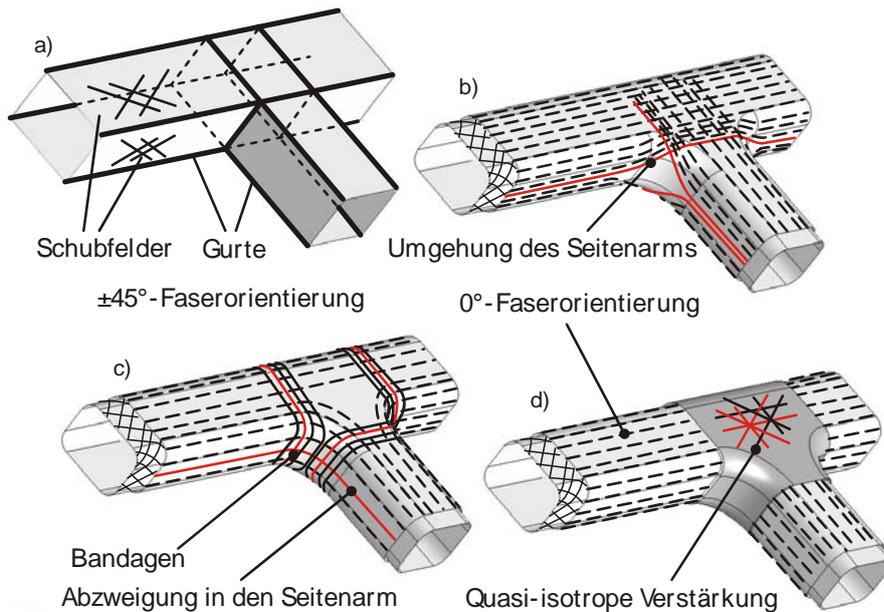
Die mechanische Prinziplösung einer Maschine oder eines Fahrzeugs basiert in der Regel auf einer Komposition von Antriebs-, Getriebe- und Tragwerkskonzepten. Bei Anpassungskonstruktionen bleiben diese Konzepte im Wesentlichen erhalten. So etwa wird das Transportfahrrad klassisch über Trekkurbeln angetrieben, wodurch auch Sattel und Lenker als Schnittstellen in gewohnter Anordnung vorzusehen sind. Ein elektrischer Hilfsantrieb wird für erste Prototypen noch nicht realisiert, das mechanische Konzept soll jedoch eine spätere Elektrifizierung ermöglichen.

Die Gestaltung des Lastenfahrrads beginnt mit einem stark abstrahierten Layout-Entwurf, der ein wenig vom Aufbau des „Long John“ inspiriert wird. Dieser Layoutentwurf gibt die räumliche Lage der wesentlichen Funktionselemente wieder, während der strukturelle Zusammenhalt noch kaum hinterfragt wird (Bild 2 oben).



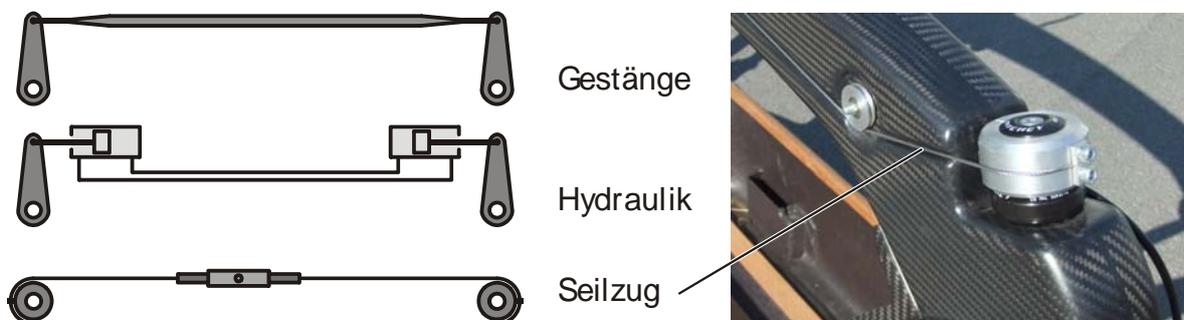
**Bild 2: Layout-Entwurf für das neue Transportfahrrad (oben) und Vorentwürfe mit unterschiedlichen Tragwerkskonzepten (unten)**

Zur steifen und festen Verbindung der Aufhängungspunkte für Antriebs- und Getriebeelemente sowie zur Bereitstellung einer tragfähigen Ladefläche werden anschließend verschiedene Tragwerkskonzepte erarbeitet. Die Tragstruktur wird dabei in eine verwindungssteife globale Rahmenstruktur und eine leichte Schalenstruktur für die Nutzlastaufnahme gegliedert (Bild 2 unten). Die Synthese des Rahmentragwerks erfolgt durch Anordnen und Verbinden von Hohlprofilen (auch: Space Frame), wobei mit möglichst großen Profilquerschnitten unter Beachtung der Bauraumbedingungen ein hohes Maß an Gestaltleichtbau zu erzielen ist. Der Stoffleichtbau wird durch eine beanspruchungsgerechte Auswahl, Schichtung und Ausrichtung der textilen Verstärkungshalbzeuge bestimmt. In geraden, ungestörten Rahmenelementen bestehen derartige Laminatvor allem aus  $0^\circ$ -Faserlagen zur Übertragung von Biegebeanspruchungen und aus  $\pm 45^\circ$ -Faserlagen zur Aufnahme von Torsionsbeanspruchungen. Bei der Bestimmung von beanspruchungsgerechten Laminataufbauten in den Knotenbereichen kann ein räumliches Schubfeldträgermodell zur Orientierung dienen (Bild 3 a) [2]. Mit dieser Modellbetrachtung wird zum Beispiel deutlich, wie die Gurte eines Seitenarms in den Schubfeldern des Hauptarms zu verankern sind. Da die Gurte des Hauptarms im Bereich der Verzweigung nicht unterbrochen werden dürfen, ergeben sich Strukturbereiche, in denen sich Gurte überkreuzen. Bild 3 b und Bild 3 c zeigen Lösungsansätze, wie die Erkenntnisse aus der Schubfeldträgerbetrachtung bei der Gestaltung von Faserverbund-Rahmenstrukturen eingebracht werden können. Im Hinblick auf eine kostengünstige Fertigung wird jedoch oft eine quasi-isotrope Faserverstärkung im Knotenbereich bevorzugt, wobei die Wandstärken lokal zu erhöhen sind (Bild 3 c). Gewisse Abminderungen beim Leichtbaugrad werden dafür in Kauf genommen.



**Bild 3: Konzeption von Faserverbund-Rahmentragwerken: a) Räumlicher Schubfeldträger als Orientierungshilfe, b) und c) beanspruchungsgerechte Faserorientierungen im Knotenbereich, d) vereinfachter Knoten mit lokaler, quasi-isotroper Verstärkung**

Im Unterschied zu klassischen Fahrrädern wird für das neue Lastenfahrzeug ein Lenkgetriebe benötigt, da der Lenker und das Gabelschaftrohr durch die Integration des Laderaums räumlich getrennt sind. Hierfür kommen verschiedene Getriebekonzepte mit Gestänge-, Seilzug- oder Hydraulikübertragung in Betracht (Bild 4). Die Wahl fiel schließlich auf einen vorgespannten Seilzug, da hiermit große Auslenkungen, Spielfreiheit, Reibungsarmut und Robustheit zu vereinbaren sind. Da für die Gestaltung einer Seilzuglenkung kaum Erfahrungen vorliegen, erfolgt die Entwicklung mit Hilfe eines Mock-Up, an dem das Übertragungsverhalten von Seilzugkonstruktionen praktisch erprobt wird.



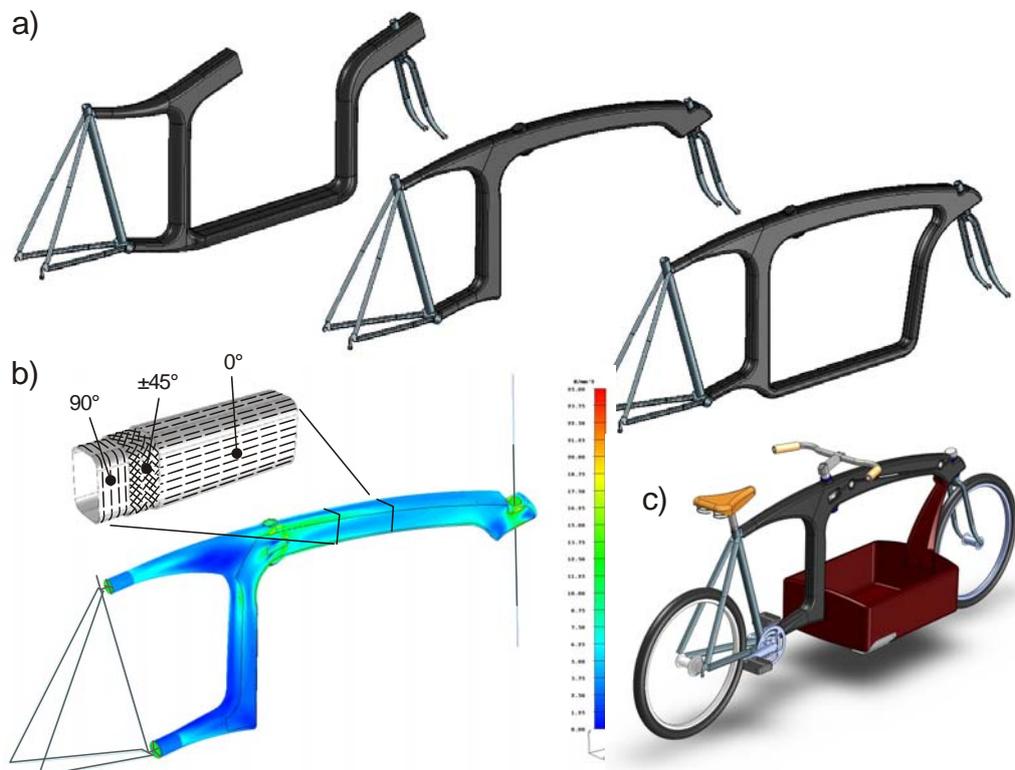
**Bild 4: Konzepte zur Lenkübertragung (links), prototypische Seilzuglenkung (rechts)**

### Entwerfen von Leichtbaustrukturen in Mischbauweise

Der Entwurf des Transportfahrradrahmens erfolgt sowohl nach Gesichtspunkten des Strukturleichtbaus als auch nach ökonomischen Aspekten. Vor diesem Hintergrund wird eine Mischbauweise erarbeitet, die einen Hauptrahmen aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) sowie einen Hinterbau und eine Gabel aus Aluminium vorsieht (Bild 5). Diese Gliederung erweist sich als vorteilhaft, da mit CFK vor allem im Bereich der sogenannten Lastfernübertragung hohe Leichtbaugrade zu erzielen sind. In den längeren großvolumigeren Rahmenelementen lassen sich die Faserverstärkungen mit vertretbarem Fertigungsaufwand beanspruchungsgerecht schichten und ausrichten. Durch den klar definierten „Kraftfluss“ kann in diesen Bereichen ein hoher Grad an Werkstoffausnutzung und Leichtbau erzielt werden. Durch die Beschränkung des CFK-Einsatzes auf den Hauptrahmen ergibt sich zudem eine flächige Rahmenstruktur, die in einem relativ einfachen, zweiteiligen Formwerkzeug herzustellen ist.

Bei der Gestaltung des CFK-Hauptrahmens werden drei Varianten diskutiert, die sich aus der grundsätzlichen Möglichkeit ergeben, die Rahmenstruktur unterhalb oder oberhalb der Nutzlastwanne anzuordnen (Bild 5 a). Ausgewählt wird eine Bauweise mit oberem Längsträger, wobei strukturelle und ästhetische Gesichtspunkte ausschlaggebend sind. Die dadurch entstehende obere Begrenzung des Laderaums wird dafür in Kauf genommen.

Während im Bereich der Lastfernübertragung Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) ihre Stärken ausspielen können, bieten metallische Werkstoffe im Bereich von Knoten und Montageflächen zumeist strukturelle und fertigungstechnische Vorteile. In diesen Bereichen steht die Isotropie der Metalle mit den komplexen räumlichen Spannungszuständen im Einklang. Darüber hinaus bieten geschweißte oder gelötete Strukturen in Differentialbauweise die Möglichkeit, relativ einfach Funktionselemente für Montageflächen vorzusehen. Da sich die meisten Montageflächen wie z. B. Tretlagergehäuse, Sattelklemme, Schaltwerksauger, Ausfallenden und Umwerfersockel am Hinterbau-Dreieck befinden, wird hierfür eine Aluminium-Schweißkonstruktion festgelegt. Für die klebtechnische Verbindung zum CFK-Hauptrahmen werden am Hinterbau zwei parallele Rohrzapfen angeschweißt, die sich in den Hauptrahmen einstecken lassen.



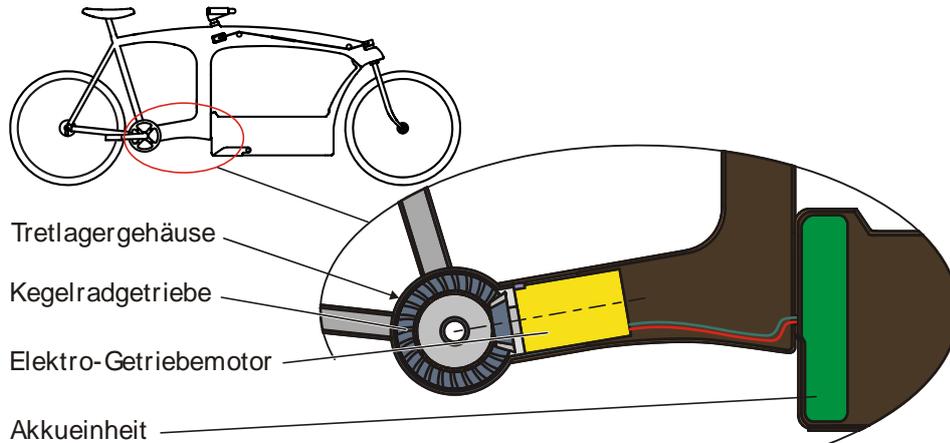
**Bild 5: Entwurf und Auslegung der Rahmenstruktur in Mischbauweise**

Die Dimensionierung der Rahmenstruktur erfolgt mit Hilfe von Finite-Elemente-(FE-) Simulationen, wobei vor allem Steifigkeitsbetrachtungen durchgeführt werden (Bild 5 b). Um ein hohes Maß an Fahrsicherheit zu gewährleisten, ist eine ausreichende Torsionssteifigkeit um die Längsachse zu erreichen. Dabei dienen Vergleichswerte und Messverfahren aus dem Rennradbereich als Grundlage [3].

Eine weitere Detaillierung des Hauptrahmens und der Anbauteile ermöglicht eine genaue Abstimmung von Anschlussflächen und ergonomischen Abständen (Bild 5 c). Dabei wird auch die Seilzuglenkung integriert, wobei die benötigten Umlenkrollen und das Drahtseil aus ästhetischen Gründen in die Rahmenoberfläche eingelassen werden. Um die Inspektion und die Wartung einfach zu halten, wird eine verdeckte Seilzugführung im Inneren des Rahmens verworfen.

Die Bauweise des Hauptrahmens bietet ferner die Möglichkeit einen elektrischen Hilfsantrieb unauffällig zu integrieren (Bild 6). Durch die Anordnung des Elektromotors im unteren Horizontalträger, kann das Antriebsmoment über ein Kegelradgetriebe direkt auf die Tretlagerwelle

übertragen werden. Um mit niedrigen Motor-Drehmomenten auszukommen und um hohe Wirkungsgrade zu ermöglichen, sollte das Abtriebskegelrad dabei möglichst groß ausgeführt werden. Folglich ist der Durchmesser des Tretlagergehäuses für eine Elektrifizierung noch zu vergrößern.



**Bild 6: Vorentwurf für einen integrierten elektrischen Hilfsantrieb**

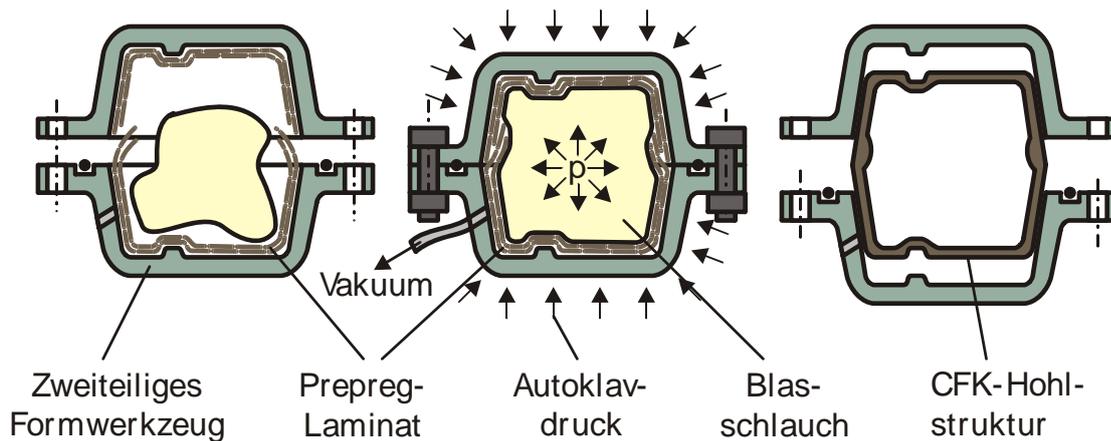
### Prototypenbau

Am Ende des Konstruktionsprozesses werden Geometriedaten für den Bau von Urmodellen aus den CAD-Modellen der beiden CFK-Strukturen abgeleitet. Die Urmodelle werden daraufhin mittels CNC-Fräsen aus Kunststoff-Blockmaterial gefertigt. Von diesen Urmodellen werden die Negativformen aus glasfaserverstärktem Kunststoff abgenommen, wobei ein Werkzeugpaar für den CFK-Hauptrahmen und ein Werkzeugpaar für die Transportbox entstehen.



**Bild 7: Formwerkzeug für den CFK-Hauptrahmen**

Beide Strukturen entstehen aus kohlenstofffaserverstärktem Epoxydharz durch manuelles Ablegen von vorimprägnierten und CNC-geschnittenen Gewebelätzungen (Prepregs). Die Verdichtung und Aushärtung des Verbundwerkstoffs erfolgt mit Hilfe der Autoklavtechnik, wobei für die Rahmenstruktur ein kombiniertes Schlauchblas-Autoklav-Verfahren zum Einsatz kommt. Für die Fertigung der Rahmenstruktur ist die Arbeitsfolge in Bild 8 schematisch dargestellt.



**Bild 8: Fertigung einer Faserverbund-Hohlstruktur im kombinierten Schlauchblas-Autoklav-Verfahren**

Nach dem Entformen der CFK-Strukturen erfolgt eine Endbearbeitung mittels CNC-Fräsen, wobei Bauteilränder getrimmt und Montagebohrungen eingebracht werden. Rahmen und Transportbox erhalten anschließend einen UV-beständigen Klarlack-Überzug mit Seidenmatt-Finish.

Eine letzte herstellungstechnische Herausforderung ist die Verklebung von CFK-Hauptrahmen und Aluminium-Hinterbau. Nach einer Reihe von Vorversuchen zur Haftfestigkeit von Klebstoffen auf Aluminium wird eine Beize-Behandlung für die Hinterbauzapfen festgelegt. Für die genaue Ausrichtung beider Komponenten kommt eine Montagelehre zum Einsatz. Die großflächigen Klebspalte werden dann über mehrere Einfüllöffnungen mit einem zäh-hart aushärtenden Zweikomponentenklebstoff verfüllt.

Um Gebrauchsspuren so weit wie möglich zu vermeiden, wird die Transportbox mit Teakholz-Leisten auf der Ladefläche und an der Ladekante ausgestattet. Die Verschraubung der Transportbox am Hauptrahmen erfolgt mit Hilfe von Einnietmuttern die in speziell verstärkte Bauteilbereiche eingesetzt werden. Die fertig gestellte Rahmenbaugruppe wird anschließend mit klassischen Mountain-Bike-Komponenten und der eigens entwickelten Seilzuglenkung komplettiert (Bild 9). Damit ergibt sich ein Gesamtgewicht von ca. 18 kg, womit eine Gewichtseinsparung von etwa 50 % gegenüber vergleichbaren klassischen Transportfahrrädern erreicht wird.



**Bild 9: Prototypisches Leichtbau-Transportfahrrad**

### Erprobung

Schon nach wenigen Metern im Sattel des neuen Transportfahrrads stellt sich ein vertrautes Fahrgefühl ein. Trotz der relativ großen Fahrzeuglänge lässt sich das Transportfahrrad einfach

steuern, wenden und handhaben. Der sehr steife Rahmen lädt schnell dazu ein, im Wiegetritt zu beschleunigen. Selbst bei mittlerer Zuladung und leichter Steigung zeigt sich bei allen Fahrern mehr Fahrfreude als Anstrengung. Von wenigen Kleinigkeiten wie z. B. Rahmendurchführungen für Brems- und Schaltzüge abgesehen sind auch nach vielen Testkilometern keine Nachbesserungen erforderlich.

### **Ausblick**

Wenngleich das neue Leichtbau-Transportfahrrad hohen Nutzwert und Fahrfreude in noch nicht gekannter Weise kombiniert, so ist das klassische Stahl-Lastenrad vom Typ „Long John“ zumindest in einer Disziplin so schnell nicht zu schlagen: „Long John“-Modelle werden seit etwa 80 Jahren erfolgreich gebaut, vermarktet und eingesetzt. Die Schritte zur Produktion und zur Vermarktung stehen für das Leichtbau-Transportfahrrad jedoch noch aus. Hierfür sind noch fertigungstechnische Vereinfachungen zu erzielen und zulassungsrechtliche Fragen zu klären.

### **Danksagung**

Die Autoren bedanken sich ganz herzlich bei Herrn Dr.-Ing. Martin Lepper, Geschäftsführer der Leichtbau-Zentrum Sachsen GmbH, für das Sponsoring des Innovationsprojekts „Leichtbau-Transportfahrrad“.

### **Literatur**

- [1] Helms, O.: Konstruktion und technologische Umsetzung von hochbeanspruchten Lasteinleitungssystemen für neuartige Leichtbaustrukturen in Faserverbundbauweise. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2006
- [2] Dieker, S.; Reimerdes, H.-G.: Elementare Festigkeitslehre im Leichtbau. Donat, Bremen, 1992
- [3] Geißler, U. (Hrsg.): Carbonrahmentest – So tested Tour. Tour – Das Rennrad-Magazin 33 (2010) 3, S. 44