

Goldenes Kalb Karbon

Vom 12. bis 13. November 2009 führte der Deutsche Verband für Materialforschung und -prüfung (DVM) gemeinsam mit dem Deutschen Institut für Normung (DIN) einen Workshop in Berlin durch. Titel: Prüfverfahren und Qualitätssicherungsmethoden unter Berücksichtigung von CFK-Werkstoffen.

Vor einem Jahr hatte der DVM in Kooperation mit dem DIN (Deutsches Institut für Normung) einen ersten Workshop zum Thema »Betriebsfestigkeit im Fahrradbau« abgehalten. Die Resonanz war so gut, dass eine Folgeveranstaltung organisiert wurde. Die Federführung hatte der mittlerweile gegründete Arbeitskreis Fahrradsicherheit, bestehend aus Dr. Eric Groß von der Technischen Universität Hamburg-Harburg, Siegfried Neuberger vom Zweirad-Industrie-Verband und Dirk Zedler, Ingenieur- und Sachverständigenbüro.

Es wurde ein breites Spektrum an Themen geboten. Die Referenten waren Fachleute, zumeist aus Forschung und Industrie. Die 70 Besucher kamen zu 53 Prozent aus der Industrie, einer vom Flugzeughersteller Airbus, 27 Prozent von Hochschulen oder Instituten und 10 Prozent meldeten sich als Sachverständige. Lediglich 1 Prozent der Teilnehmer war dem Handel zuzuordnen, die Übrigen liefen unter »Sonstige«. Diese Verteilung zeigt bereits, dass hochkarätige Vorträge zu erwarten waren.

Erkenntnisse zu Karbon

Einige der Referenten erklärten einleitend den Aufbau von Karbonwerkstoffen: Neben Spritzgussteilen mit eingelagerten Kurzkarbonfasern sind vor allem die Faserverbundbauteile mit Langfasern bekannt. Aus Fasern und der Matrix als Duro- oder Thermoplast entsteht mit unterschiedlich hohem Anteil an Handarbeit das fertige Bauteil (siehe auch RadMarkt 8/2006, Seite 85 bis 93, und RadMarkt 9/2006, Seite 86 bis 91)

Aus diesem Materialaufbau ergibt sich zweierlei: Erstens sind nicht alle Bauteile gleichermaßen für die Konstruktion mit dem Kohlefaserwerkstoff geeignet. Besonders bieten sich Strukturen an, die übersichtliche Lastfälle auf großen Bauteilflächen einleiten können. Wegen der sehr hohen Ermüdungsfestigkeit sind hohe Lastwechselzahlen kein Problem.

Zweitens kann nicht verallgemeinert von »dem« Bauteil gesprochen werden, da bei dem hohen Anteil an Handarbeitsschritten aufgrund der hohen Serienstreuungen eigentlich Einzelstücke vorliegen.

Volker Carl, Carl Messtechnik und Prüfsysteme, Dinslaken: »Eine Prüfung der mechanischen Kennwerte ermöglicht keine Lokalisierung einer möglichen Schädigung. Hier sollte ergänzend die aktive Thermographie eingesetzt werden, besonders wenn es um biegebelastete CFK-Komponenten geht, die fehlerfrei sein müssen. Auch Kerbstellen innerhalb des Bauteils, wie Wanddickenunterschiede oder Poren, lassen sich mit der Thermographie schnell, bildgebend und kostengünstig ermitteln.«

Letztlich ist der Faserverbund als Werkstoff sowohl von den Eigenschaften der Faser (hohe Steifigkeit und Festigkeit) als auch denen der Matrix (hohe Bruchdehnung) abhängig. Der Verbundwerkstoff selbst mit seinen Eigenschaften entsteht erst bei der Herstellung des Bau-

teiles, es liegen also keine absolut fixen Werkstoffkennwerte vor, wie etwa bei Metallen.

Fertigungskennnisse nicht standardisiert

Das Karbonbauteil wird in seinen mechanischen Kennwerten zwar durch die Eigenschaften der Ausgangswerkstoffe bestimmt, vor allem aber durch die fasergerechte Konstruktion sowie die Güte der Fertigung. Ein Problem der Hersteller ist, dass es keine zertifizierte Aus- oder Fortbildung und Prüfung für Fertigungspersonal in der EU oder in Asien gibt. Dieses Manko kann nur durch eine gewisse Kontinuität bei den Mitarbeitern und in den Produktionsabläufen selbst ausgeglichen werden. Hier müssen die Hersteller ihre Abläufe genau überwachen und im Zuge von Qualitätssicherungsmaßnahmen alle Randbedingungen und Arbeitsschritte exakt definieren und während der Fertigung dokumentieren lassen.

Zur Kontrolle der laufenden Serienqualität von Karbonbauteilen bieten sich neben den klassischen mechanischen Testverfahren auf Prüfständen weitere an. Steifigkeit und Gewicht geben Aufschluss darüber, ob exakt gearbeitet wurde. Wurden alle Gewebelagen und die Matrix nach Vorgabe eingebracht, so liegt das gemessene Gewicht nahe am Sollwert. Wurden einzelne Gewebelagen so eingelegt, dass der Faserverlauf nicht optimal ausgerichtet ist, oder liegen gar Unregelmäßigkeiten wie Delaminationen vor, so ist die Bauteilsteifigkeit geringer, als zu erwarten. Als Referenz dient ein Produktionsmuster von unzweifelhafter Qualität oder ein theoretischer Wert, der anhand der Konstruktion erwartet werden muss.

Steifigkeitsmessungen können auch dazu dienen, Schäden zu beurteilen, die durch die Nutzung entstanden sind. Dafür müssen aber Vergleichsmessungen desselben Bauteils im unbeschädigten Neuzustand vorliegen. Zwischen Steifigkeit und Festigkeit besteht bei Karbonbauteilen, anders als bei Metallen, ein recht enger Zusammenhang.

Fasergerechte Konstruktion

Liegen die Fasern in der Belastungsrichtung und treten keine Belastungen quer dazu auf, so spricht man vom Idealfall der fasergerechten Konstruktion. Hierzu sind Kenntnisse über die auf das Bauteil einwirkenden Kräfte erforderlich, wie sie vor allem aus der Realdatenerfassung gewonnen werden können. Auch die innerhalb des Bauteiles auftretenden Kräfte, die aus theoretischen Berechnungen ermittelt werden, müssen berücksichtigt werden. Bei idealer Belastung der Fasern innerhalb des Bauteiles ist Karbon meist steifer und gleichzeitig auch fester als andere Konstruktionswerkstoffe. Das gilt insbesondere, wenn das Werkstoffgewicht berücksichtigt wird, wenn also spezifische Werte miteinander verglichen werden. Wird das Verbundmaterial jedoch nicht optimal

über einen bestimmten Zeitraum zu ertragen. Impact ist eine Stoßbelastung, wie sie bei Überlast, etwa dem nicht bestimmungsgemäßen Gebrauch oder Unfällen, auftreten kann. Bei Tests ist zu unterscheiden, ob die einzelnen Lastfälle am selben Probanden durchgeführt werden, gegebenenfalls auch, in welcher Reihenfolge, oder ob für jede Einzeluntersuchung ein separates Teil verwendet

wird. Insbesondere bei Verbundwerkstoffen liefern Versuchsreihen, die mit nur einem Bauteil durchgeführt werden, die realitätsnäheren Ergebnisse. Und: Ohne den Fahrer einzubeziehen, kann das letztlich zu beurteilende Gesamtsystem kaum praxisgerecht abgebildet werden.

Verschiedene Schädigungsmechanismen

Bei multidirektionalen Laminaten, die aus mehreren unidirektionalen Einzelschichten aufgebaut sind, kommen unterschiedliche Schädigungsmechanismen vor: Lösen der Verbindung zwischen Faser und Matrix oder unterschiedliche Bruchformen der Karbonfasern selbst (zum Beispiel Bruch längs oder quer zur Faserrichtung, Knicken). Seltene, hohe Lasten haben einen großen Einfluss auf die Schwingfestigkeit der Bauteile aus CFK (= kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff). Die detaillierte Ausgestaltung des

Lagenaufbaus kann zu Querspannungen an den Rändern führen (sowohl Zug als auch Druck). Bei Schädigung eines CFK-Bauteiles ändern sich seine Eigenfrequenzen und Dämpfungseigenschaften, einhergehend mit einer verringerten Restfestigkeit bis hin zum Verlust der Matrix-Stützwirkung und somit einem Bauteilkollaps.

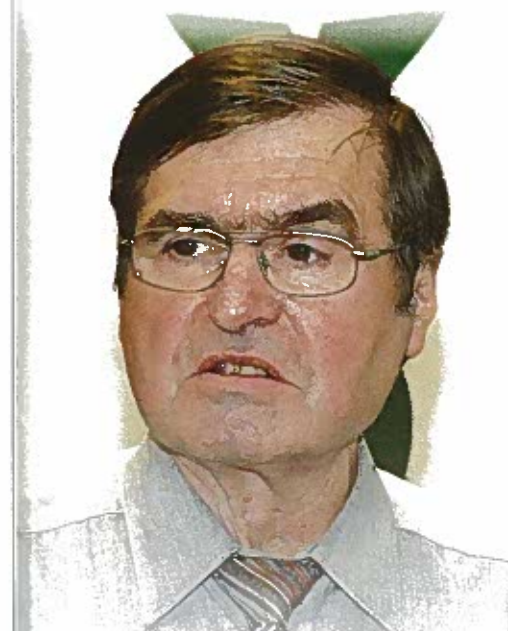
Einfluss auf die Betriebsfestigkeit von CFK-Werkstoffen haben nicht nur das Ausgangsmaterial nebst Verarbeitungsgüte und die äußeren Belastungen. Auch Klima, chemische Medien, abrasive Verschleiß (Sand, Hagel, Regen), elektrische Entladungen sowie Infrarot- und Ultraviolett-Strahlung können die mechanischen Kennwerte herabsetzen.

Wegen der Heterogenität des Faserverbundmaterials treten andere Versagensmechanismen und Schadensbilder auf, als das bei den bereits gut erforschten Metallen der Fall ist. Störungen oder Fehlstellen im Bauteil können im Laufe der Zeit unbemerkt fortschreiten und zu meist unerwartetem Bauteilversagen führen.

Da mit Hilfe gängiger mechanischer Versuche solche unsichtbaren Vorschädigungen nicht oder nur bedingt offengelegt werden können, gibt es für die zerstörungsfreie Bauteilprüfung unterschiedliche Verfahren: akustische, optische, thermische, radiographische, elektrische oder magnetische sowie mechanische. Die Thermographie wird seit etwa zehn Jahren in der Luft- und Raumfahrttechnik zur zerstörungsfreien Prüfung von anisotropen Leichtbaustrukturen eingesetzt. Das Prinzip beruht auf der Messung eines



Stefan Berggren, Trek Bicycle Corporation, Waterloo, USA: »Bei Reklamationen ist es für den Hersteller meist einfacher das Bauteil auszutauschen, als es aufwendig zu untersuchen. Das spart Zeit und Kosten und der Hersteller ist auf der sicheren Seite.«



Professor Egon Füglein, Steinbeis TZ Prüf- und Messtechnik, Maidbrunn: »In Mehrstufenversuchen kann bei richtiger Wahl der Beanspruchungs-Zeit-Funktion ein direkter Praxisbezug hergestellt werden. So können 30.000 Kilometer Fahrleistung im Labor in nur acht Stunden nachgefahren werden.«

belastet, also quasi-isotrop oder gar quer zur Faserrichtung, dann liegen die Vergleichswerte wesentlich niedriger.

Werden Belastungen von Karbonbauteilen untersucht, so werden unterschiedliche Lastfälle unterschieden, genau wie bei Bauteilen aus anderen Werkstoffen. Die statische Last beschreibt die Fähigkeit des Bauteiles, Energie ohne Schädigung aufzunehmen. Ermüdung beschreibt die Eigenschaft, definierte Lasten wiederholt



Rüdiger Heim, Fraunhofer LBF, Darmstadt: »Sonderereignisse und Einzelmisbrauch sind bei der Bestimmung der Betriebsfestigkeit zu berücksichtigen. Für den Nachweis der Betriebsfestigkeit sind multi-disziplinäre Kompetenzen unbedingt erforderlich. Das können eigentlich nur Institute wie das Fraunhofer LBF gewährleisten.«

VELO-CLEAN
Fahrradreiniger

besten Reiniger im Test der »aktiv Radfahren« - jetzt wieder in der handlichen 500ml Flasche

Hanseline
...da saust die Maschine

www.hanseline.de • eMail info@hanseline.de
Gessert & Sohn • Siemensstr. 17 • 40721 Hilden



Thomas Mertin, THM Faserverbund-Technologie, Alt Duvenstedt: »Bei Fahrradbauteilen aus Karbon ist besonders kritisch, dass die Montagestandards bei Herstellern und im Handel sehr unterschiedlich sind. Erst recht beim Endverbraucher werden teils erhebliche Fehler gemacht, die umso schwerer wiegen, wenn etwa Verbindungen zu Transportzwecken wiederholt beansprucht werden.«

künstlich erzeugten Wärmeflusses im Prüfling, der im Bereich von Fehlstellen gestört wird und auf der Probenoberfläche Reaktionen zeigt. Das Verfahren ist ohne Zeitaufwand anzuwenden und erzeugt ein bildgebendes Dokument, welches zusammen mit den weiteren Unterlagen der Qualitätssicherung archiviert werden kann.

Eine typische Bauteilschädigung ist der Impact. Diese Schädigung muss nicht unbedingt die Steifigkeit beeinflussen, denn der Schaden liegt nur lokal begrenzt vor, beeinflusst also kaum die Gesamtkennwerte – zumal dann, wenn er

bei Belastung von Schädstellen ausgehen. Diese Geräusche werden dem Ohrenschein nach wahrgenommen. Zur qualifizierten Beurteilung ist jedoch Erfahrung erforderlich und es kann das Vorhandensein einer Schädigung nur festgestellt, jedoch nicht quantifiziert werden.

Sensibler Werkstoff

Bauteilversagen wird bei Karbonbauteilen meist nicht durch die auftretenden Betriebslasten verursacht, sondern durch das tägliche Handling. Als sensibler Topend-Werkstoff ist Karbon mit Alltagsbelastungen allzu oft überfordert.

Wegen der Anisotropie* des CFK-Werkstoffes sind die Bauteile besonders empfindlich gegen nicht vorhersehbare Belastungen, wie sie dem nicht bestimmungsgemäßen Gebrauch zugeschrieben werden müssen. Beim »normalen« Alltagsgebrauch sind solche Belastungen an der Tagesordnung. CFK ist besonders empfindlich gegenüber lokalen Druckkräften und Schlägen. Es verbeult nicht, sondern wegen der geringen Bruchdehnung des Materials bilden sich Risse.

Die Belastungen an Klemmstellen sind vergleichbar. Inserts aus Alu verteilen an Klemmstellen die Druckkräfte flächig in der Karbonstruktur und schaffen so Anschraubmöglichkeiten. Wegen Korrosionsgefahr müssen die Aluteile zwingend geschützt sein, etwa durch eine Eloxalschicht. Kann der CFK-Werkstoff grundsätz-

lich auch hohe Belastungen aufnehmen, so ist die Kombination mit anderen Materialien nicht immer einfach. Lack kann rissig werden, obwohl das darunterliegende Karbon noch intakt ist. Problematischer ist es schon mit der Kombination Karbon-Klebstoff: Wird Letzterer rissig oder brüchig, so ist die Tragfähigkeit der Gesamtkonstruktion gefährdet.

CFK-Bauteile aus hoch modularen Fasern, sogenannten HM-Fasern (High Modulus = hochsteif), werden wegen ihres hohen E-Moduls kaum verformt. Ein Bruch tritt



Manfred Otto, EFB Prüftechnik GmbH, Waltrop: »Sofern den Besonderheiten von CFK Rechnung getragen wird, sind die mechanischen Eigenschaften sehr gut. Ziel von qualifizierten Prüfmethoden sollte es sein, die Schadensquote auf ein angestrebtes Niveau zu reduzieren.«

hier also unvermittelt, ohne Vorwarnung auf. Grundsätzlich sind im Umgang mit Karbonbauteilen strikte Regeln einzuhalten und hohe Sorgfalt bei Montage, Kontrolle und im Betrieb ist unumgänglich. Maßnahmen zur Schadensermittlung und -beurteilung nach Stürzen sind unbedingt mit dem Hersteller abzustimmen.

*Anisotropie: Eigenart von Kristallen, nach verschiedenen Richtungen verschiedene physikalische Eigenschaften zu zeigen



Dominik M. Laveuve, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF: »Schädigungsmechanismen von CFK-Bauteilen sind im Gegensatz zu metallischen Werkstoffen komplex und schwer zu modellieren. Um sie dennoch realistisch einschätzen und beurteilen zu können, sind möglichst wirklichkeitsnahe, mehrachsige Versuchsbelastungen für den Betriebsfestigkeitsnachweis erforderlich«

nicht im Hauptkraftfluss der eingebrachten Belastung liegt. Eine besonders einfache Variante der zerstörungsfreien Prüfung sind Geräusche, die

Martin Perterer, Lehrstuhl für Leichtbau (LLB), Technische Universität München, Institut für Luft- und Raumfahrt, Garching, München: »Augenscheinlich können Materialschäden kaum beurteilt werden. Erst zerstörungsfreie Prüfmethoden in Kombination mit zerstörenden Prüfverfahren erklären den Zusammenhang zwischen Schadensgröße und der dabei noch vorhandenen mechanischen Belastbarkeit. Die Größe des Bauteilschadens hat wesentlichen Einfluss auf das Bauteilversagen.«



Leicht.Schick.Stark

NEU

Dieser
NACHTFALTER



... verkauft sich auch am Tag bestens.



NEU: Das leichteste Faltschloss FS 300 TRIGO™

- nur 750 g Gewicht
- hohe Sicherheit gegen Gelegenheitsdiebe
- besonders einfacher Schließmechanismus



Click-In Führung



- leichter Kunststoff-Halter in Trendfarben
- rüttelsichere Befestigung an den Flaschenhalterösen oder am Sattelrohr

TRELOCK
INSPIRED GERMAN INNOVATION

www.trelock.de



Marco Noack, UBC Composites, Murr: »Die Bauteileigenschaften hängen stark von den Fertigungsparametern ab, die sich im Nachhinein nur noch mit viel Aufwand feststellen lassen. Vor allem ein hoher Anteil an Handarbeit erfordert eindeutige »Gebrauchsanweisungen« zur Herstellung. Deshalb ist eine lückenlose Qualitätssicherung und -dokumentation vor, während und nach Abschluss der Fertigung unerlässlich.«

Risiken von Karbon

Karbon wird, untechnisch betrachtet, von den Herstellern gerne auch als Differenzierungsmerkmal genutzt, um Kaufwünsche auszulösen. Oft ist der Endkunde fasziniert vom Image seines neuen Produktes, dabei aber im Unklaren über die Nutzungsmöglichkeiten, insbesondere über die Nutzungsgrenzen. Zudem sind die Anforderungen an den Gebrauch eines Fahrrades in den letzten Jahren enorm gestiegen.

Die Betriebslasten eines Fahrrades werden vom Fahrer und seiner Fahrweise bestimmt. Der Hersteller (Produktmanagement, Konstruktion, Fertigung) kann diese kaum einschätzen, zumal der Übergang zum Missbrauch fließend ist. Niemand kann beeinflussen oder kontrollieren, was im Produktlebenszyklus passieren wird beziehungsweise welchen Belastungen ein Bauteil bereits ausgesetzt wurde.

Die Lasten sind also weitestgehend unbestimmt. Sie ergeben sich aus den Extrem- oder Grenzlaster sowie den wiederholten dynamischen Kräften, den variablen Amplituden. Über eine individuelle Häufigkeitsverteilung ergibt sich das Beanspruchungskollektiv. Aus der Bauteilstruktur (Geometrie, Werkstoff, Fertigung) ergibt sich die Schwingfestigkeit des Bauteiles. Zusammen mit dem Beanspruchungskollektiv

Fahrräder weisen jeweils eine Streubreite auf. Ziel muss es sein, die geringste ertragbare Bauteilspannung höher auszuführen als die höchste auftretende Beanspruchung, die aus der maximalen Betriebslast resultiert. Betriebslastenuntersuchungen wurden zwar in den letzten Jahren mehrfach durchgeführt, doch wegen unterschiedlicher Nutzungsarten und naheliegendem Fehlgebrauch ist der Unsicherheitsfaktor nach wie vor hoch.

Die Bauteilfestigkeit von Metallkonstruktionen ist im Fahrradbau sehr sicher zu lenken. Bei Karbonbauteilen ist deutlicher Mehraufwand erforderlich. Die Spanne zwischen den Mittelwerten der Belastung und der Belastbarkeit ist ein Maß für die Sicherheit. Die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Produktes wird beschrieben durch die Überschneidung von maximaler Belastung und minimaler Belastbarkeit. Sind die tatsächlich auftretenden Lasten bekannt, so ist Leichtbau ohne Risiko möglich.

Herstellerdaten sammeln

Auch bei den Experten herrscht in manchen Fragen Unklarheit oder Unstimmigkeit vor. So vermag niemand sicher zu beurteilen, inwieweit eine Vorschädigung eines Karbonbauteiles die weitere Lebensdauer beschränkt. Anscheinend wurde dieser Einfluss in den letzten Jahren höher bewertet, als es nach heutigem Kenntnisstand erforderlich ist. Auch wurde in der Expertenrunde angeregt, die Hersteller mögen sich über Schäden von Karbonbauteilen sowie die Art des beobachteten Schadensfortschrittes gegenseitig austauschen, um statistisch besser gesicherte Erkenntnisse zu erlangen.

ergibt sich die Betriebsfestigkeit des Fahrzeuges, woraus über eine Schädigungsrechnung die Lebensdauer abgeschätzt werden kann.

Sowohl die Betriebslasten, die der Nutzer verursacht, als auch die Bauteilfestigkeit aller in Gebrauch befindlichen



Sridaran Venkat Ramanan forscht am Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren in Saarbrücken: »Wegen der Überschaubarkeit der Systemstrukturen von Fahrradrahmen hatte unser Institut hier gute Forschungsbedingungen. Lasten wurden ebenso untersucht wie Schadensfälle. Dabei wird mit unterschiedlichen Systemen gearbeitet, Aufzeichnung und Analyse gehören in jedem Fall dazu. Es sollen zerstörungsfreie Möglichkeiten geschaffen werden, die eine Bewertung der Bauteilschädigung bis hin zur Restlebensdauervorhersage ermöglichen.«

Fazit

Karbon ist anders als andere Konstruktionswerkstoffe beim Bau von Fahrradrahmen oder Komponenten. Das gilt es in der Konstruktion zu berücksichtigen, ebenso in der Fertigung und im Qualitätswesen einschließlich der vielfältigen Test- und Prüfverfahren. Doch auch die Normen müssen an einigen Stellen die Besonderheiten der Verbundwerkstoffe noch besser berücksichtigen. Hierzu gab es bereits erste Schritte: Im September 2009 kam die CEN TC-333 (Technical Committee for Cycles) zusammen und befand, es müsse auch bei den geltenden Normen besonderes Augenmerk auf Verbundwerkstoffe gelegt werden. Doch schon der Workshop des DVM hat die Experten in der Branche zusätzlich sensibilisiert. Dadurch wird das Thema Karbon als Konstruktionswerkstoff im Fahrradbau und auch die Sicherheit des Fahrrades allgemein wieder ein Stück vorangetrieben.

Text/Fotos: Jörg Kreinjobst



Dirk Zedler, Ingenieur- und Sachverständigenbüro für Fahrradtechnik, Ludwigsburg: »Viele Probleme mit Fahrradteilen aus CFK resultieren aus einer falschen Erwartungshaltung des Kunden und mangelndem Wissen der Mechaniker im Radgeschäft. Schulungen und Weiterbildung von Händlern und Mechanikern sind vonnöten, in der Fachpresse muss fundiert und realitätsgetreu berichtet werden und der Endverbraucher muss mit seinem Produkt klare Anweisungen erhalten.«



Cross-Country Weltmeister 2009
Bino Schuster, Team Scott, Swisspower



DIE ERSTE 2X10 MTB GRUPPE



SRAM®, RockShox®, Avid® und Truvativ® haben etwas Einzigartiges geschaffen: die erste komplette 2x10 Mountainbike Gruppe: XX™.

Bremsen so stark, Schaltsysteme so schnell und BB30 Kurbeln so steif um den höchsten Ansprüchen des Mountainbike World Cups zu genügen. Das leichteste, voll einstellbare System. Entwickelt für jeden, der eine neue Dimension des Mountainbikens erleben möchte.

