

TEXT UND FOTOS: ROBERT KÜHNEN

Was haben ein Grashalm, ein Flugzeug und ein Fahrrad gemeinsam? Den konstruktiven Ansatz: Alle drei Gebilde sind Leichtbauten, und zwei von ihnen orientieren sich am gemeinsamen Vorbild. Die „Idee“ des Leichtbaus ist das Entwicklungsprinzip der Natur: mit einem Minimum an Materialeinsatz ein Maximum an mechanischen Eigenschaften zu erzielen und so Ressourcen zu schonen. Dieses Prinzip haben sich Ingenieure von der Natur abgeschaut und wenden es auf eine Vielzahl von Konstruktionen an. Angenehme Dinge wie Flugreisen und elegante, leicht zu bedienende Sportgeräte sind die direkte Folge. Dabei hat man auch eine scheinbar paradoxe Erfahrung gemacht: Leichter kann stabiler sein. Klingt verrückt? Ist es aber nicht. Die Verbindung von geringem Gewicht und Haltbarkeit erfordert allerdings mehr konstruktiven Aufwand.

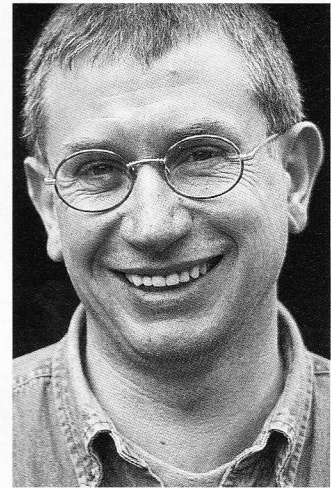
LEICHT ALLEINE REICHT NICHT

Einen nur leichten Rahmen zu bauen, ist keine Kunst. Schon schwieriger ist die Konstruktion eines leichten und haltbaren Rahmens. Die echte Herausforderung besteht aber darin, geringstmögliches Gewicht sowie ausreichende Steifigkeit und hinreichende Lebensdauer unter einen Hut zu bringen. Erst dann kann man von gelungenem Leichtbau sprechen. Näher zu klären ist, was unter „hinreichend“ oder „ausreichend“ zu verstehen ist. Bestimmte Steifigkeitswerte, wie sie zum Beispiel in TOUR-Tests gemessen werden, sollte ein Rahmen keinesfalls unterschreiten, sonst leiden die Fahreigenschaften. Setzt man die Steifigkeit des Rahmens in Bezug zum Gewicht, so erhält man eine erste Kennzahl für die Qualität des Leichtbaus, die TOUR als „STW-Quotient“ bezeichnet (STW steht für „stiffness to weight“). Auffällig ist das unterschiedliche Leichtbaupotential der Werkstoffe. Im Verhältnis Gewicht zu Steifigkeit schlägt Aluminium alle anderen Materialien, die im Fahrradrahmenbau verwendet werden. Damit ist allerdings noch nichts über die zu erwartende Lebensdauer gesagt.

WIE LANGE IST LANGE GENUG?

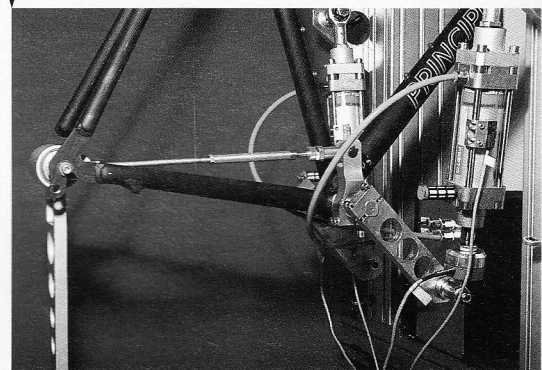
Profi-Rennfahrer empfinden möglicherweise schon ein Fahrwerk, das nur ein Rennen zuverlässig übersteht, als hinreichend langlebig, wenn der kurzen Lebenszeit entsprechende Vorteile gegenüberstehen. Tourenfahrer hingegen wünschen sich lieber einen zuverlässigen Rahmen, der sie viele Jahre klaglos trägt und nie im Stich läßt. Vom technischen Standpunkt verlangen beide einen „betriebsfesten“ Rahmen, der die vorgesehene Nutzungsdauer ohne Schaden übersteht. „Betriebsfestigkeit“ ist die vorrangige Anforderung für alle Leichtbauteile. Flugzeuge, Autos und Fahrräder müssen betriebsfest sein. Der Gegenentwurf zur betriebsfesten Auslegung ist die dauerfeste Konstruktion. Dauerfest bedeutet: Auch nach einer „unendlich“ langen Belastung tritt kein Bruch auf. Dieser kleine Unterschied in der Definition hat eine große Wirkung in der Umsetzung. Bei dauerfesten Konstruktionen wird schnell der mehrfache

DAS TESTVERFAHREN



Idealist:
Manfred Otto kämpft zäh und ausdauernd für mehr Qualität im Fahrradbau und führte den TOUR-Rahmen-test durch

Damit die Qualität der Rahmen zuverlässig beurteilt werden kann, muß auch das Prüfverfahrengehobenen Qualitätsansprüchen genügen. Die EFBe-Prüfung (EFBe steht für „Engineering for Bikes“) ermöglicht dies durch eine realitätsnahe Aufspannung des Rahmens sowie die computergesteuerte Meß- und Regeltechnik. Die von TOUR gegenüber der DIN-Prüfung angehobenen Lasten garantieren, daß die Hochleistungsrahmen mit Kräften konfrontiert werden, die im sportlichen Einsatz relevant sind. Zur Aufspannung: Der Rahmen wird vorne mit einer speziellen Meßgabel fest eingespannt, den Hinterbau hält eine elastisch gelagerte Pendelstütze, die das Hinterrad nachbildet. Simuliert wird damit die Fahrsituation im Wiegetritt, der die größte Belastung für den Rahmen darstellt. Zwei Pneumatikzylinder leiten die Tretkräfte unter einem Winkel von 7,5 Grad (entspricht dem Kippen des Rades im Wiegetritt) wechselseitig in die Kurbeln ein, ein Gestänge überträgt den Kettenzug auf den Hinterbau. Die Kurbeln stehen auf 45 Grad – in dieser Stellung bringt der Fahrer die größte Kraft auf. Wechselseitig werden nun zunächst 100.000 Zyklen mit 1.200 N, dann weitere 100.000 mit 1.300 N aufgebracht. Die Meßtechnik erfaßt die Auslenkung des Rahmens unter der Prüfkraft und schaltet die Prüfung ab, sobald ein größerer Riß auftritt.



Materialeinsatz erforderlich. Deshalb läßt sich längst nicht alles was fliegt, fährt und schwimmt dauerhaft konstruieren. Dauerfeste Flugzeuge beispielsweise würden ihrer Funktion nicht gerecht: Sie kämen nie vom Boden weg.

„PRAXIS“-TEST

Über die Betriebsfestigkeit von Fahrradrahmen gibt es Erkenntnisse aus der Praxis – vor allem in den Reklamationsabteilungen der Hersteller. Das theoretische Wissen ist jedoch eher dürftig, denn Prüfungen der Betriebsfestigkeit gehören nicht zum Standard in der Fahrradindustrie. Spätestens dann, wenn neue Rahmenformen konzipiert und neue Werkstoffe verwendet werden, fällt dieses Defizit jedoch auf. Denn ohne maschinelle Prüfung der Dauerhaltbarkeit sind keine zuverlässigen Aussagen über das Stehvermögen neuer Konstruktionen zu treffen. Nicht wenige Hersteller drücken sich um diese als lästig empfundene Pflicht und drehen den Spieß einfach um: Sie warten ab, wie sich ihre Produkte in der Praxis bewähren – doch so soll es nicht sein.

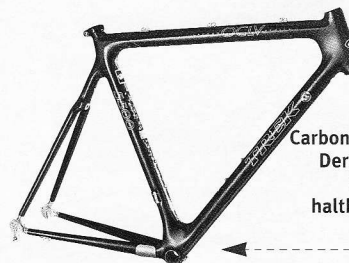
TOUR hat sich deshalb nach einem Prüfverfahren umgesehen und ist bei dem Spezialisten EFBe-Prüftechnik fündig geworden. Manfred Otto, der Geschäftsführer des Bochumer Prüftechnik-Herstellers, ist ein Mann der ersten Stunde, wenn es um das fachgerechte Zerstören von Fahrradrahmen geht. Das von ihm entwickelte Prüfverfahren für einen Rahmendauertest bildet einen der Kernpunkte der neuen Fahrrad-Prüfnorm DIN 79100, die zum Jahresende in Kraft treten wird. Gegenüber anderen Prüfverfahren (siehe zum Beispiel TOUR-Gabeltest, Heft 1/97) ist dieser Einstufentest zwar simpel, aber wirkungsvoll: Simuliert wird der Wiegetritt – nicht die einzige, aber die höchste Hürde, die auf dem Weg zu dauerhafter Haltbarkeit überwunden werden muß. Die beste Empfehlung für das jahrelang erprobte Verfahren liefert die Praxis: Die Schadensbilder, die auf dem Prüfstand gewonnen werden, gleichen laut Manfred Otto denen, die in der Fahrpraxis auftreten. Damit ist eine der wichtigsten Voraussetzungen für ein realistisches Prüfverfahren gegeben. Nur eines kann auch dieses Verfahren nicht leisten: Vorhersagen über mögliche Kilometerleistungen. Aussagen wie „dieser Rahmen hält 20.000 Kilometer“ sind auf der Basis dieses Tests unzulässig. Dazu wäre ein höchst aufwendiger Betriebsfestigkeitstest nötig.

Die DIN-Prüfung sieht für Fahrräder aller Art, die im Straßenverkehr bewegt werden – vom Einkaufsrad bis zur Rennmaschine – eine Mindestlast von 850 Newton (knapp 85 Kilogramm) vor, die 100.000mal abwechselnd links und rechts auf die Pedale einwirkt. Für einfache Räder ist die neue, verschärfte DIN damit ein echter Prüfstein. Der sportliche Einsatz konfrontiert das Material jedoch mit ganz anderen Belastungen. Deshalb prüft TOUR die Rahmen wesentlich härter: Zunächst sind 100.000 Lastwechsel mit 1.200 Newton zu absolvieren, dann wird der Rahmen mit dieser Vorgeschichte in der nächsthöheren Belastungsklasse mit 1.300 Newton getestet. Übersteht er die insgesamt 200.000 Lastwechsel ohne Bruch, wird der Test beendet.

DIE STELLVERTRETER



Alu optimal genutzt:
Sehr steif, leicht und
sehr haltbar –
Cannondales CAAD3 ist
vorbildlich konstruiert



Carbon auf hohem Niveau:
Der leichteste Rahmen
im Test ist einer der
haltbarsten. Exzellente
Ingenieursarbeit!



Titan fürs Volk:
Schmolkes leichtge-
wichtiger Titan-Rahmen
überrascht mit hervor-
ragender Haltbarkeit



Stahl traditionell:
Barellias SLX ist nicht
leicht, bietet aber
vernünftige Haltbarkeit
zum günstigen Preis

Zwölf Rahmen aus vier Werkstoffen durchliefen den Test. Aus den Ergebnissen lassen sich – allerdings ohne statistische Absicherung – Schlüsse über das Potential der Werkstoffe für den Rahmenbau ziehen. Aluminium ist derzeit der Leichtbauwerkstoff mit dem besten Verhältnis von Steifigkeit zu Gewicht. Clever konstruiert, sind diese Rahmen auch sehr haltbar – siehe Cannondale und Principia. Carbon schneidet innerhalb des Testfeldes auch hervorragend ab – der Werkstoff für die Zukunft. Titanrahmen können leicht, auch haltbar, aber nicht sehr steif gebaut werden. Stahl ist der Werkstoff mit dem schlechtesten Leichtbaupotential.

DIE KANDIDATEN

Acht leichte Rahmen in der Gewichtsklasse zwischen 1.200 und 1.500 Gramm schickt TOUR ins Rennen. Produkte renommierter Hersteller – von Trek, Klein, Cannondale, Merlin und Principia – treffen dabei auf Rahmen mit weniger klangvollen Namen, die aber genauso leicht sind. Eine spannende Ausgangsposition, denn die Preisunterschiede sind gewaltig. Die Bandbreite reicht vom 5.199 Mark teuren Merlin-Titan-Rahmen bis zum 1.299 Mark preiswerten Stevens-Aluminium-Gestell. Stahlrahmen sind in dieser Gewichtsklasse nicht konkurrenzfähig; mit dem Nemo-Rohrsatz von Columbus läßt sich zwar auch in Stahl die 1.500-Gramm-Schwelle unterbieten, aber nur, wenn kleine Rohrdurchmesser gewählt werden (verschiedene Außendurchmesser stehen beim Nemo-Konzept zur Wahl). Solch ein Rahmen ist in der Testgröße 58 Zentimeter nicht steif genug und wird daher auch nicht geprüft.

Stahl muß trotzdem ran – als Vergleichsmaßstab: Zwei gemuffte und zwei geschweißte Rahmen dienen als Referenzen. Die beiden gemufften Rahmen stammen von De Rosa und Borellia und basieren auf dem erfolgreichsten Stahlrohrrahmen der letzten zehn Jahre: Columbus SLX. Sie repräsentieren den klassischen Stahlrahmen mit schlanken Rohren. Stellvertretend für modernen Stahlrahmenbau stehen der sehr leichte, geschweißte Fondriest-Rahmen aus hauchdünnem Rohr mit großem Durchmesser und der mittelschwere, einfacher gehaltene Nishiki-Rahmen, der ebenfalls geschweißt ist.

LEICHT UND STARK

„Pfffffft, pfff, pffiffitt“ Zwei Wochen lang leisten die computergesteuerten Pneumatikzylinder im EFBe-Labor Schwerstarbeit und trachten den Rahmen fauchend nach dem Leben. Die Besten der Besten fordern der Maschine zwei Tage Schwerstarbeit ab – und geben dennoch nicht auf! Drei Leichtrahmen stehen die Folter ohne sichtbare Spuren durch. Nach 200.000 paarweise ausgeteilten Hüben, die auch die steifsten Rahmen sicht-

bar verwinden, schaltet der Computer die Prüfung für Cannondale, Trek und Principia planmäßig ab.

Ein sensationelles Ergebnis, angesichts zarter Rohre und enormer Prüflasten. Auch für Manfred Otto kommt das Ergebnis überraschend: „Das sind die leichtesten Rahmen, die je über den EFBe-Prüfstand gewandert sind, aber auch zugleich die haltbarsten.“ Nur knapp scheidet der Time-Carbonrahmen an der Hürde und erliegt einem Bruch der Kettenstrebe nach 182.000 Tritten ins Rahmenherz. Ebenfalls sehr gut schlägt sich der zweitleichteste Rahmen des Vergleichs und übertrifft damit alle Erwartungen: Schmolkes preiswerter Titan-Rahmen aus russischer Fertigung knackt nach 160.000 Lastwechseln. Kleins Quantum Race scheidet früher: nach 132.000 Lastwechseln bricht das Unterrohr. Abgeschlagen folgt Merlins Titan-Prunkstück Team Road und bereitet damit die größte Enttäuschung: Der Rahmen bricht bei – gemessen am Preis – mageren 106.000 Lastwechseln. Das Schlußlicht unter den leichten Rahmen bildet Stevens RPR4-Modell, das allerdings auch mit Abstand am preiswertesten ist.

Stahl in der Krise: De Rosas SLX bricht bereits nach 57.000 Lastwechseln und kommt damit nicht halb soweit wie Brügelmanns Borellia-Rahmen aus dem gleichen Rohrsatz. Interessanterweise brechen beide auf die gleiche charakteristische Weise knapp oberhalb der unteren Steuerrohrmuffe – ein Bruchtyp übrigens, den TOUR-Tester auch schon in natura gesehen haben. Der für Stahlverhältnisse extrem leichte Fondriest-Rahmen übersteht den ersten Zyklus nicht und bricht wie der viel schwerere Nishiki-Rahmen nach knapp 80.000 Schwingspielen.

INTERPRETATIONEN

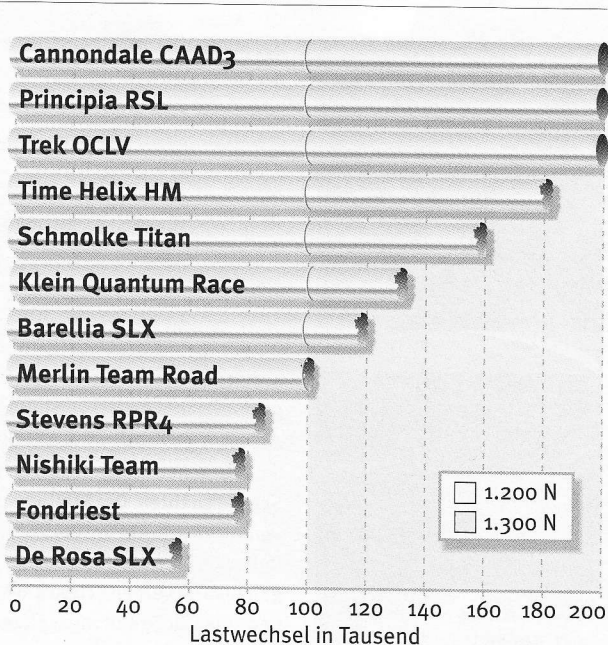
In seiner Deutlichkeit ist das Ergebnis überraschend und erfreulich. Erfreulich deshalb, weil es belegt, daß durch gründliches Nachdenken bei der Konstruktion alle erwünschten positiven Eigenschaften miteinander vereinbar sind: Haltbarkeit, Steifigkeit und Minimalgewicht

ZAHLEN UND FAKTEN ZU DEN GETESTETEN RAHMEN

Rahmen	Gewicht	RH	Preis ⁽¹⁾	Material/Bauweise	Lastwechsel ⁽²⁾	Bruchbild
Borellia SLX	2.080	58	798	Stahl, gemufft	119.316	Steuerrohr, untere Muffe
Cannondale CAAD3	1.520	60	1.990	Alu, geschweißt	200.000	kein Bruch
De Rosa SLX	1.895	57	1.650	Stahl, gemufft	56.690	Steuerrohr, untere Muffe
Fondriest	1.630	61	2.600	Stahl, geschweißt	77.171	beide Kettenstreben
Klein Quantum Race	1.415	57	2.700	Alu, geschweißt	131.907	Unterrohr, Kabelführung
Merlin Team Road	1.525	60	5.199	Titan, geschweißt	100.595	Unterrohr, Schalthebelsockel
Nishiki Team	2.080	56	1.390	Stahl, geschweißt	78.206	Tretlager/Sattelrohr/Unterrohr
Principia RSL	1.460	60	1.895	Alu, geschweißt	200.000	kein Bruch
Schmolke Titan	1.300	59	2.000	Titan, geschweißt	160.356	Unterrohr, Flaschenhalterbohrung
Stevens RPR4	1.515	57	1.299	Alu, geschweißt	85.032	rechte Kettenstrebe
Time Helix HM	1.485	57	2.990	Carbon/Alu, gemufft	181.966	rechte Kettenstrebe
Trek OCLV	1.200	58	2.800	Carbon, gemufft	200.000	kein Bruch

(1) Preis für Rahmenkit mit Gabel in DM, (2) bis 100.000 mit 1.200 N getestet, dann auf 1.300 N erhöht, (3) Lenkkopfsteifigkeit/ Tretlagersteifigkeit

DIE ERGEBNISSE IM ÜBERBLICK



Die Resultate im Detail: Der Test teilt sich auf in zwei Hälften. Zunächst sind 100.000 Lastwechsel mit 1.200 N Belastung zu absolvieren. Dann wird die Kraft auf 1.300 N erhöht und weitere 100.000 Lastwechsel setzen den Rahmen zu. Sobald der Computer größere Risse registriert, wird der Test beendet. Wichtig: Das Schädigungspotential der zweiten Stufe ist deutlich größer als das der ersten Stufe. Ein Rahmen, der den kompletten Zyklus durchsteht ist deshalb wesentlich standhafter als einer, der nach 100.000 Lastwechseln bricht. Insgesamt zeigen die Rennrahmen aber ein hohes Leistungsvermögen. Verglichen mit „einfachen“ Freizeiträdern, haben alle getesteten Rahmen ein gutes Standvermögen. Drei besonders leichte Rahmen sind sehr gut: Cannondale, Principia und Trek durchliefen den Test ohne Bruch, die Maschine wurde abgestellt.

sind jedenfalls keine Forderungen, die sich gegenseitig ausschließen. Keine Frage, daß manche Kaufentscheidung in Zukunft von diesem Ergebnis geprägt werden wird.

Dennoch bedarf das Ergebnis der Interpretation, damit keine Mißverständnisse entstehen. Keiner der getesteten Rahmen ist nach unserer Einschätzung bedenklich oder gar gefährlich. Auch für die „schlechteren“ Rahmen in diesem Test gilt: Den meisten Rennradfahrern wird die Farbe ihres Rades nicht mehr gefallen, bevor die zu erwartende Lebensdauer erreicht wird. Starke und schwere Fahrer, die konsequent mit hohem Krafteinsatz zu Werke gehen, sollten aber zu den nachweislich haltbareren Gestellen greifen.

Weil nur jeweils eine Stichprobe getestet wurde, läßt sich auch keine Aussage über die Qualität und die Streuung innerhalb der Serie treffen. Bei Schweiß- und Löt-konstruktionen sind erhebliche Abweichungen vom Stichprobenergebnis nicht ungewöhnlich. Es macht daher wenig Sinn, die erzielten Lastspiele zu eng auszulegen. Bei diesem Test kommt es nicht auf 10.000 oder 20.000 Schwingspiele mehr oder weniger an, sondern auf die Größenordnung: Der Time-Rahmen beispielsweise (182.000 Lastwechsel) und der Titan-Russe (160.000) kämpfen in der gleichen Liga. Jenseits aller Unwägbarkeiten der Stichprobenuntersuchung untermauert der Test insgesamt aber die These vom haltbaren Leichtbau: Die Resultate der leichten und aufwendig konstruierten Rahmen häufen sich am oberen Ende der Ergebnisskala, die der preiswerteren und schwereren Konstruktionen am unteren Ende.

Daß Alu- und Carbonrahmen in diesem Test länger halten als die Stahlrahmen, ist nach unserer Einschätzung keine Frage des Werkstoffs, sondern des konstruktiven Aufwands. Nicht das Material, sondern seine gekonnte Verwendung gibt den Ausschlag. Logischerweise konzentrieren die Hersteller ihre konstruktiven Anstrengungen aber auf Rahmen mit einem guten Leichtbaupotential – und die werden aus Alu oder Carbon gefertigt, nur ausnahmsweise (wegen geringer Steifigkeit) aus Titan.

AUS FEHLERN LERNEN

Die Bruchbilder zeigen, daß häufig kleine Ursachen für den Bruch verantwortlich sind: Bohrungen und Kerben im hochbelasteten Unterrohr sowie in der Kettenstrebe sollten vermieden werden, auch kleine Schweißstellen für Anbauteile sind kritisch. Besonders Aluminium ist ein kerbempfindliches Material, daß solche „Vorschäden“ nicht verzeiht, aber auch Titan zeigt sich im Test diesbezüglich sensibel. Bezeichnend für die Qualität der Leichtrahmen ist, daß keiner an einer tragenden Schweiß- oder Klebeverbindung gebrochen ist: Kleins Quantum Race brach am Schaltzugeintritt im Unterrohr, Schmolkes Titan-Rahmen an einer Flaschenhalterbohrung, Merlins Team Road ausgehend von der Schweißnaht des Schaltsockels. Die Dimensionierung der Hauptrohre und ihrer Verbindungen stimmt also.

Rahmensteifigkeit ^①	Bezug/Infos
64,6/86,2	06196/750075
91,3/92,1	0031/541589898
66,8/80,6	02871/275555
79,9/76,8	0821/27250
89,0/94,5	06103/50700
65,9/81,3	040/4806040
67,2/93,5	02871/275555
83,5/91,85	0531/2872913
64,3/70,2	06139/6735
77/84,7	040/4806040
66,5/86,2	07159/945930
75,3/94,5	06103/50700

Die kleinen Schwachstellen, die der TOUR-Test aufzeigt, könnten vermutlich durch geringfügige Modifikationen ausgemerzt werden.

Bei Carbonkonstruktionen bilden häufig die Verbindungsstellen zu anderen Materialien die Schwachpunkte. Beispiel Time: Hier brach (sehr spät) der massive Alu-Stutzen, der, vom Metall-Tretlagergehäuse ausgehend, die rechte Kettenstrebene hält. Der Trek-Rahmen mit seinen Carbon-Muffen läßt die Kräfte – so die Vermutung – gleichmäßiger fließen und erzielt auch dadurch eine höhere Lebensdauer.

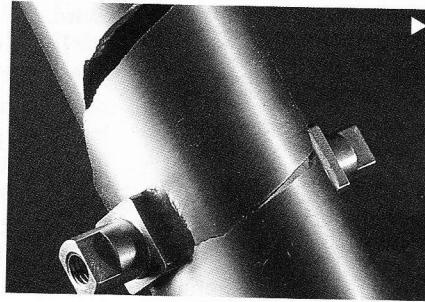
Die Brüche der gelöteten und geschweißten Rahmen deuten auf Temperaturprobleme beim Löt-, beziehungsweise auf Spannungskonzentrationen in der Schweißnaht hin. Durch eine verbesserte Prozeßführung sollten sich bessere Ergebnisse erzielen lassen. Eine positive Seite der Stahlrahmen läßt dieser Test unberücksichtigt: Stahl ist nicht so kerbempfindlich und steckt kleine Beschädigungen daher besser weg. Auch im Korrosionsverhalten sind die Stahlrahmen überraschenderweise unkritischer als manche Alu-Rahmen. Stahl rostet zwar, tut dies aber langsam. Einige typische Alu-Legierungen des Fahrradrahmenbaus sind hingegen vergleichsweise anfällig für die sogenannte „Korngrenzen-Korrosion“, die sich sehr zügig durch das Material arbeiten und so einen Bruch verursachen kann.

FAZIT

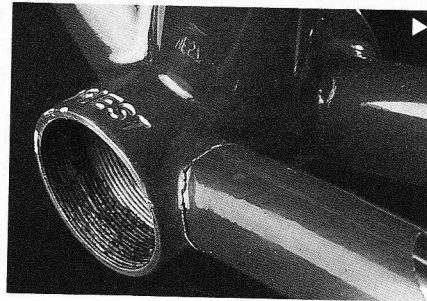
Glückwunsch an die Konstrukteure: Die besten vier der acht Leichtrahmen sind nicht nur sehr leicht, sondern auch extrem haltbar und repräsentieren Leichtbau auf hohem Niveau. Widerlegt ist das Gerücht vom früh brechenden Aluminium, von den allzeit überlegenen Werkstoffen Stahl und Titan. Leider läßt sich anhand des optischen Eindrucks nie sicher abschätzen, was lange hält und was früh bricht. Auch die TOUR-Tester wurden von einigen Ergebnissen überrascht. Wünschenswert wäre, daß Top-Rahmen von unabhängiger Stelle ihre Qualität bescheinigt bekommen. Es ist höchste Zeit für ein Gütesiegel, das überlegenen Produkten ihre Top-Leistung bescheinigt!



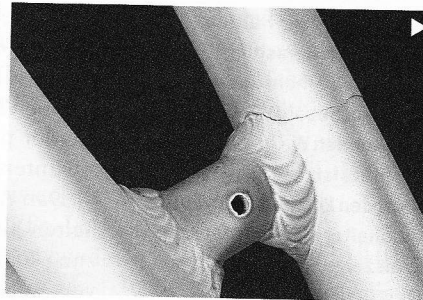
BRUCHKEIME: KLEINE URSACHE - GROSSE WIRKUNG



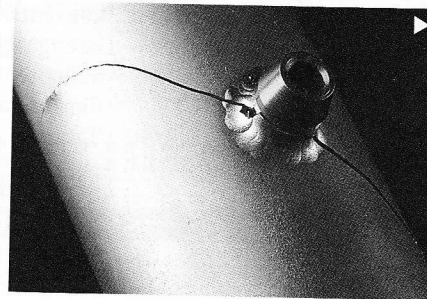
Der Mythos von der Unzerstörbarkeit wackelt: Relativ zeitig – gemessen am Preis und den hohen Erwartungen – wand sich ein Riß spiralförmig durch das Unterrohr des Merlin-Team Road-Titan-Rahmens. Ausgangspunkt: die kleine Schweißnaht des Schaltsockels



Klassischer Dauerbruch bei Fondriest: Beide Kettenstreben des leichtgewichtigen Stahlrahmens brachen relativ früh in den Schweißnähten. Der Steifigkeitssprung vom dünnen, elastischen Rohr zum massiven Tretlagergehäuse ist vermutlich zu groß und sorgt für Spannungsspitzen



Kettenstreben: Der Stevens RPR4-Rahmen erlitt ebenfalls einen Bruch der rechten Kettenstrebene. Die durch den Kettenzug wechselnd nach außen gebogene Strebene versagte an einer Stelle, wo sich zwei Effekte überlagern: Kerbwirkung durch die Schweißnaht und die Delle im Rohr



Schwachstelle Bohrung: Schmolkes Titan-Rahmen riß ausgehend von der Flaschenhalterbohrung ein. Spannungsspitzen an Bohrungen sind ein klassischer Bruchauslöser. In diesem Fall wurde die Bohrung allerdings gut verstärkt. Vermutlich verursachte die Schweißnaht den Bruch



Zu warm geworden? De Rosas SLX-Stahlrahmen erlitt einen Bruch des vergleichsweise massiven Steuerrohres. Zu den möglichen Ursachen zählt eine übermäßige Erwärmung des Rohrknotens beim Löt-, Das Beispiel zeigt, daß viel Masse nicht unbedingt viel hilft und daß die an den Werkstoff angepaßte Verarbeitungstechnik eine sehr wichtige Rolle spielt