

# Einsatz des Programmsystems COSAR bei der Zweiradentwicklung

Helmut Horeschi, Dieter Schäfer

## 1. Problemstellung

In der Erzeugnisgruppe Fahrräder werden jährlich hohe Stückzahlen [1] für den Binnen- und Exportmarkt gefertigt (1986 – 650 000 Stück). Die Weiterentwicklung zielt aber auch zunehmend auf eine Sortimentsverbreiterung ab, um das jeweils passende Velo für den speziellen Einsatzzweck, wie Stadt-, Rennsport- oder Crossfahrrad, zu fertigen.

Als es ab 1970 in den meisten Industrieländern zur „Wiederentdeckung“ des Fahrrades mit den damit verbundenen großen Produktionssteigerungen kam, gingen große Impulse auf die Technologie aus. Zunehmend kamen und kommen automatisierte Löt- und Schweißverfahren in der Rohr-Rahmenfertigung zum Einsatz.

Trotz jahrzehntelanger Fertigung existieren keine exakten theoretischen Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten. Der sehr forcierte Leichtbau für den Hochleistungssport basiert zum großen Teil auf experimentellen Untersuchungen und der handwerklichen Rahmenfertigung.

Mit der Einführung moderner Fügeverfahren in der Großserienfertigung ergab sich die Notwendigkeit, auch rechnerisch das Spannungs- und Verformungsverhalten von Fahrradrahmen und Tragelementen zu betrachten.

Über erreichte Ergebnisse zur Berechnung von Fahrradrahmenvarianten in Abhängigkeit vom Fügeverfahren wird berichtet. Die Besonderheiten zum Belastungsmodell des muskelgetriebenen Zweiradfahrzeuges werden herausgearbeitet.

## 2. Bedingungen für das Berechnungsmodell von Fahrradrahmen

### 2.1. Belastungsmodell für Fahrradtypen der industriellen Massenfertigung

Vor Beginn der rechnerischen Analyse von Fahrradrahmen wurden zunächst die Betriebsbeanspruchungen gemessen, da auf keine Literaturwerte aufgebaut werden konnte. Das Fahrrad als muskelgetriebenes Zweiradfahrzeug weist gegenüber dem motorisierten Fahrzeug in der Hinsicht Besonderheiten auf, daß die aufgebrachte Antriebsleistung sehr unterschiedlich ist. Für einen „Normalradfahrer“ wurden die aufgebrachten Kräfte in Abhängigkeit vom Fahrzyklus meßtechnisch [2], [3] ermittelt. Die Bezugnahme auf einen „Normalfahrer“ mit ca. 120 Watt Dauerleistungsvermögen mußte deshalb erfolgen, weil hochtrainierte Sportler etwa 3mal höhere Antriebskräfte realisieren, andererseits aber die Dauerfestigkeit und eine hohe Lebensdauer nicht in gleichem Maße von Interesse sind.

Im mechanischen Modell fanden zunächst 7 Lastfälle (Fahrzyklen) Berücksichtigung (Bild 1).

- Lastfall 1 Quasistatisch, Fahrer hat aufgesessen
- Lastfall 2 Der Fahrer hat aufgesessen, geringe Belastung
- Lastfall 3 Mäßiges Beschleunigen, Kräfte senkrecht angreifend
- Lastfall 4 Maximales Beschleunigen im Wiegetritt, Fahrer ist aus dem Sattel gegangen, das Fahrrad wird rhythmisch, wechselseitig um  $10^\circ$  geneigt
- Lastfall 5 Notbremsung, maximale Bremsverzögerung, Betätigen von 2 Bremsen auf trockener Straße
- Lastfall 6 Mäßiges Bremsen
- Lastfall 7 Das Fahrrad ist seitlich geneigt um  $15^\circ$ , der Fahrer steht auf dem untenstehenden Pedal

### 2.2. Fahrradrahmen mit eingebauter Vorderradgabel als Stabwerksmodell

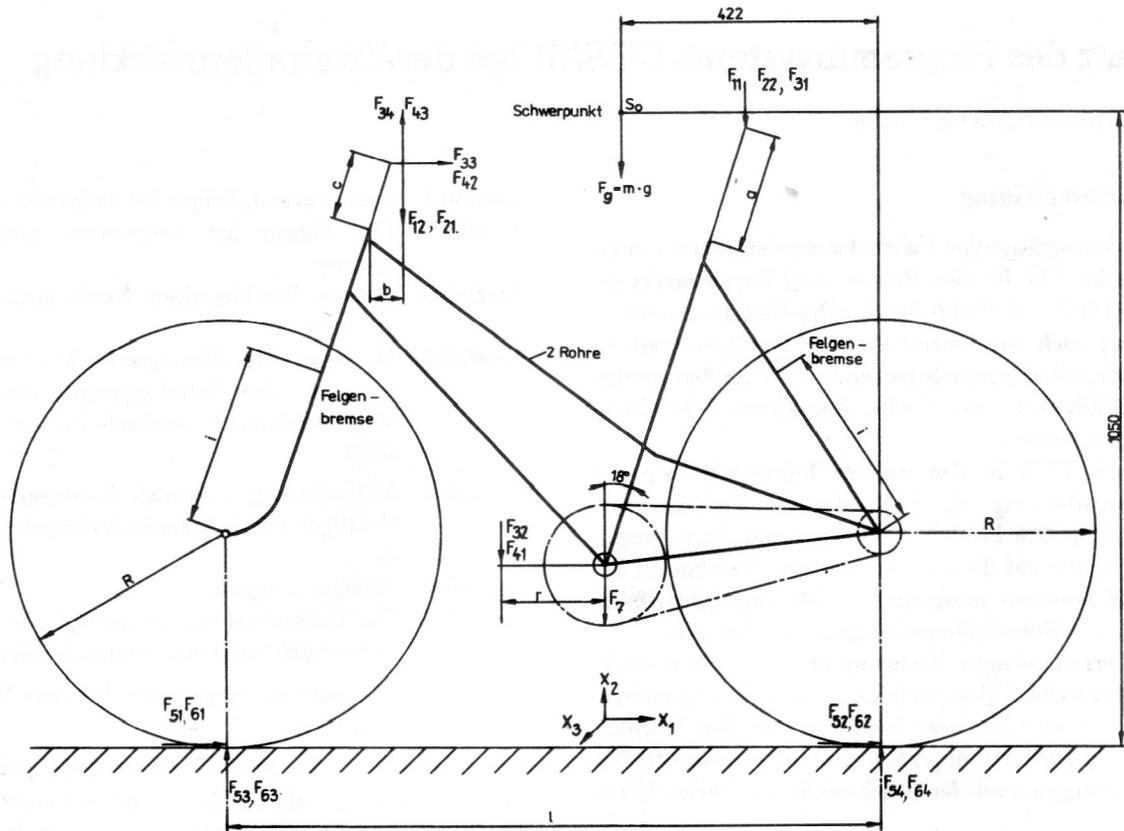
In Abhängigkeit vom Nutzerkomfort lassen sich offene und geschlossene Fahrradrahmen unterscheiden. Unabhängig von der Bauweise stellen sie hochgradig statisch unbestimmte Tragwerksysteme dar. Entsprechend dem Grundgedanken der Methode der finiten Elemente werden die Rahmen in geometrisch einfache Elemente (räumliche Balken) zerlegt. Das Beispiel einer Vernetzung ist für das Touren-Tandem im Bild 2 dargestellt. Für die Rechnung wurde das räumliche Balkenelement BR 12 [4] angewendet. Das globale Koordinatensystem liegt mit seinem Ursprung in der Mitte des Getriebehäuses (Lagerung des großen Kettenrades).

An der Vorderradgabel wird das Loslager und am Hinterwinkel das Festlager angenommen.

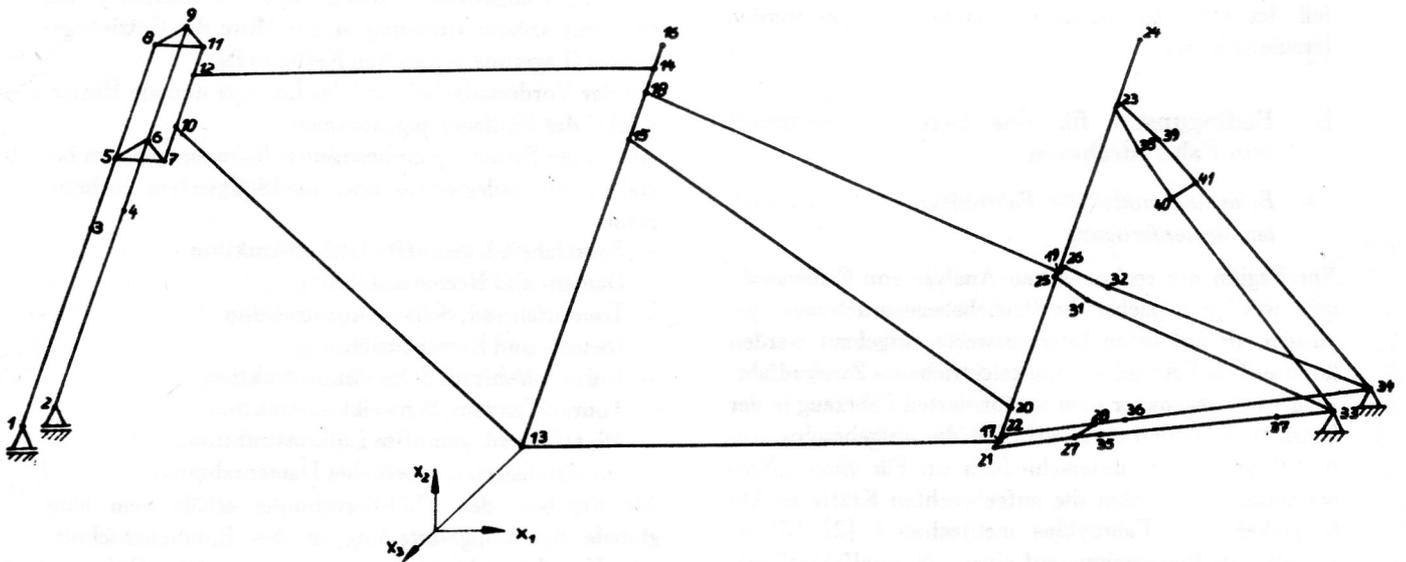
Alle in die Rechnung einbezogenen Rahmenvarianten bestehen aus unlegiertem oder niedriglegiertem Röhrenstahl:

- Sportfahrrad, gemuffte Löt konstruktion  
Damen- und Herrenauführung
- Tourenfahrrad, Schweiß konstruktion  
Damen- und Herrenauführung
- Universalfahrrad, Schweiß konstruktion
- Touren-Tandem, Schweiß konstruktion
- Mixtefahrrad, gemuffte Löt konstruktion,  
ein stabilisierter, sportlicher Damenrahmen.

Als Ergebnis der FEM-Berechnung erhält man eine globale Spannungsverteilung in den Rahmenabschnitten. Von besonderem Interesse war, welche Höhe erreichen die Schubspannungen ( $\tau_t$ ) für die Lastfälle der außermittigen Krafteinleitung (Lastfälle der Beschleunigung – Pedalieren)? Für ausgewählte Rahmenformen wird beispielhaft das Spannungsniveau in die Rahmenbereiche eingetragen. Die Aussagefähigkeit der Ergebnisse wird durch die grafische Darstellung der elastischen Rahmenverformung erhöht.



**Bild 1**  
Belastungsmodell für Mixtefahrrad, Einzelkrafteinleitung



**Bild 2**  
Finite Elemente – Vernetzung  
Touren-Tandem

### 3. Ergebnisse der Strukturspannungsanalyse zu den wichtigsten Fahrradrahmenformen

#### 3.1. Spannungsverteilung bei geschlossenen Rahmenbauformen

Am Beispiel des quasistatischen Lastfalles, wenn der Fahrer eine aufrechte Sitzposition eingenommen hat, soll die Spannungsverteilung am traditionellen Herrenrahmen [5] dargestellt werden.

Die Kräfteinleitung geschieht am Lenker und im Sitzrohrbereich (Bild 3). Im Rohrknotenbereich des Steuerrohres werden die höchsten Spannungen errechnet. Für die Sportgerätefertigung des Hochleistungssportes werden endverdickte Rohre angewendet, um für den klassischen Trapezrahmen einen extremen Leichtbau durchzusetzen. Mit der rechnerischen Spannungsanalyse dieses Spezialrahmens wurden Grundlagen erarbeitet, um auch für den Tourenrahmen in der Zukunft Fortschritte bei der Massereduzierung zu erzielen.

#### 3.2. Spannungsverteilung bei offenen Rahmenbauformen

Klappfahrrad-, Universalfahrrad- und die klassischen Damenfahrradrahmen weisen eine andere Spannungsverteilung auf. Für die betrachteten Lastfälle liegen die Spannungsspitzen im Rohrknotenbereich Ober- und Sitzrohr. Bei Prüfstandsuntersuchungen kam es an dieser Stelle auch zu Ermüdungsrissen (Bild 4).

#### 3.3. Spannungsverteilung am Touren-Tandemrahmen in Herren-Damenbauweise

Auch für das Tandem, als hochbeanspruchtes doppel-sitziges Fahrrad, war der Festigkeitsnachweis auf Basis von 20 000 km Laufleistung zu erbringen. Das Modell ist als Schweißkonstruktion ausgeführt. In der Berechnung wurden 3 Rahmenformen [6] betrachtet. Die konstruktiven Unterschiede ergaben sich bei der Gestaltung der Damenvariante und bei der Abstützung der Hinterradlagerung. Die maximalen Spannungen traten bei der Produktionsvariante in der Umgebung des Steuerrohres auf; damit konnte auch die Zweckmäßigkeit der konstruktiven Änderung nachgewiesen werden.

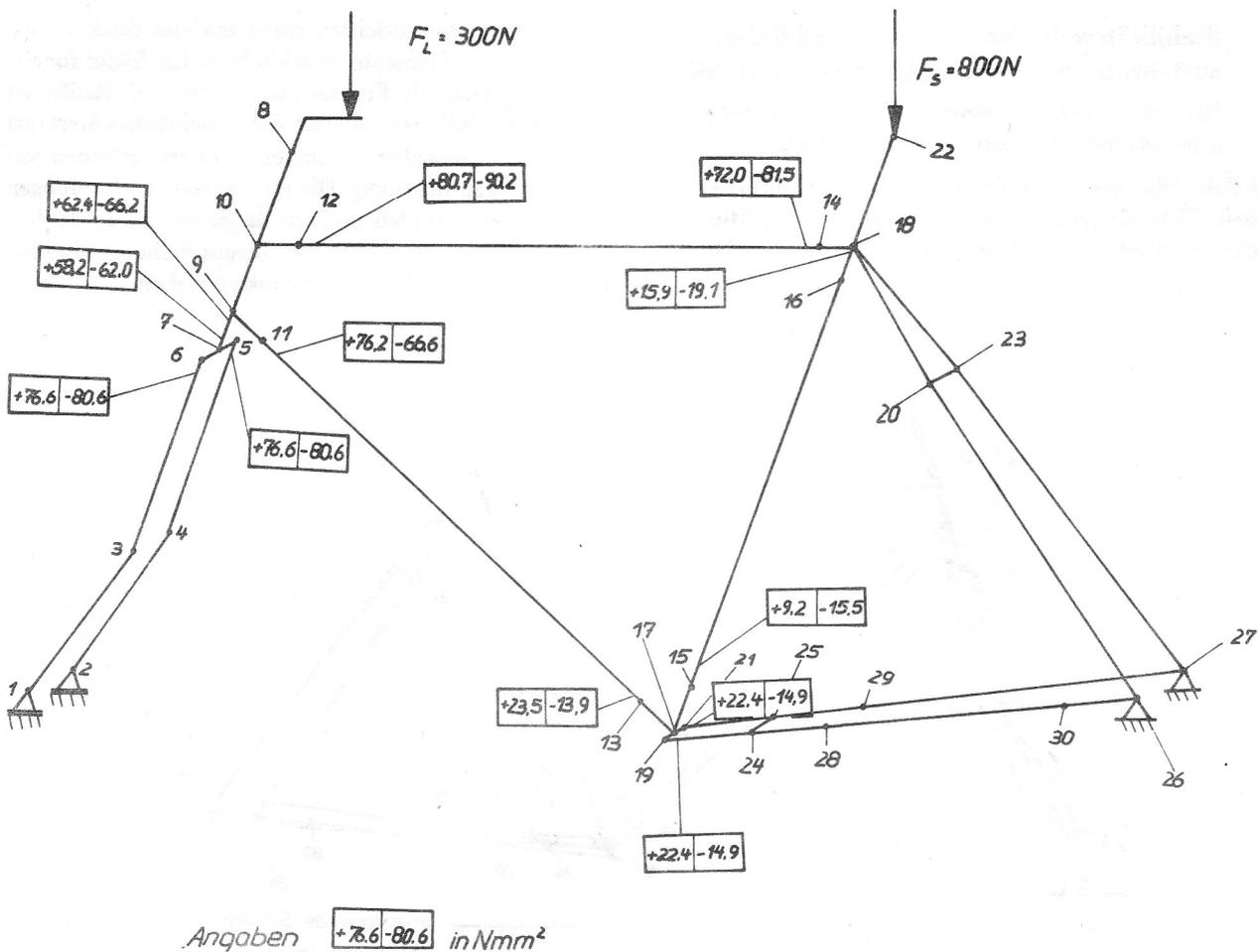
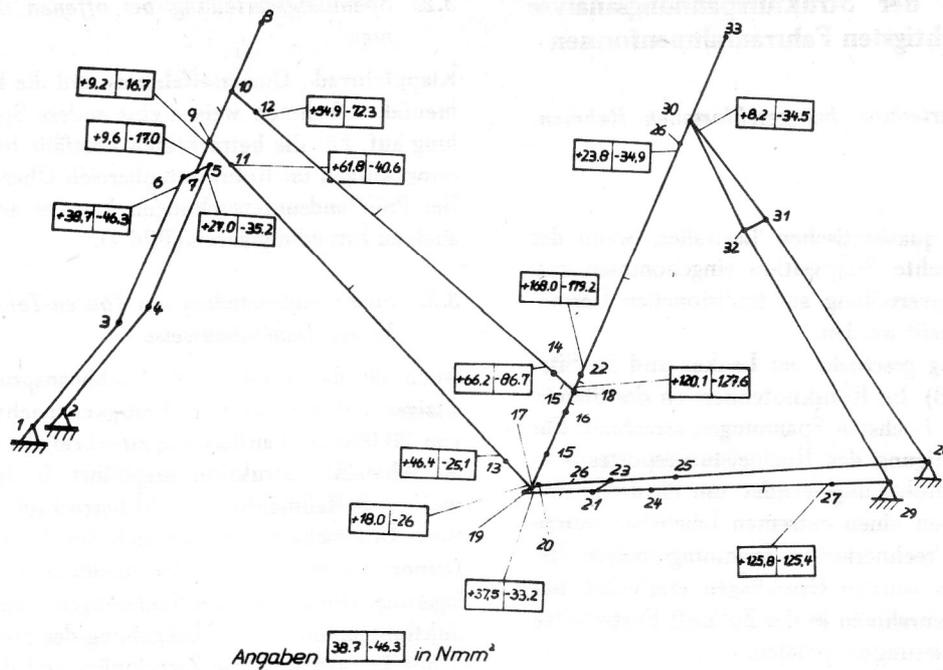


Bild 3  
Spannungsverteilung für den quasistatischen Lastfall  
 $F_{ges} = 1100 \text{ N}$   
Herrenrahmen, geschweißt



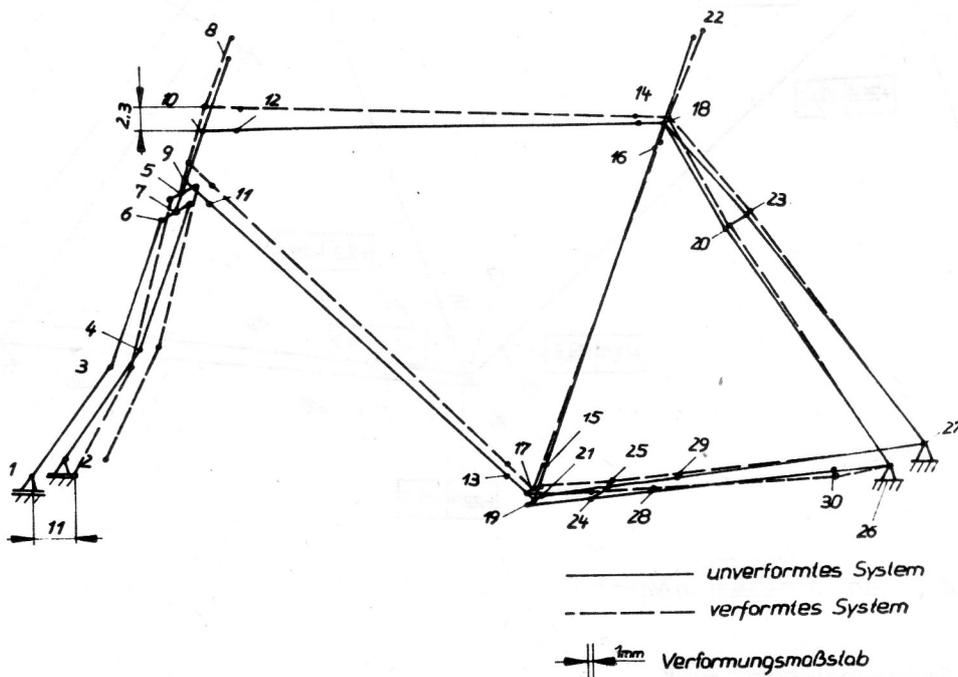
**Bild 4**  
Globale Spannungsverteilung am Tourenrahmen, Damenvariante  
für Lastfall mäßiges Bremsen

#### 4. Stabilitätsverhalten von Fahrrad-Rahmen- ausführungen in Abhängigkeit vom Lastfall

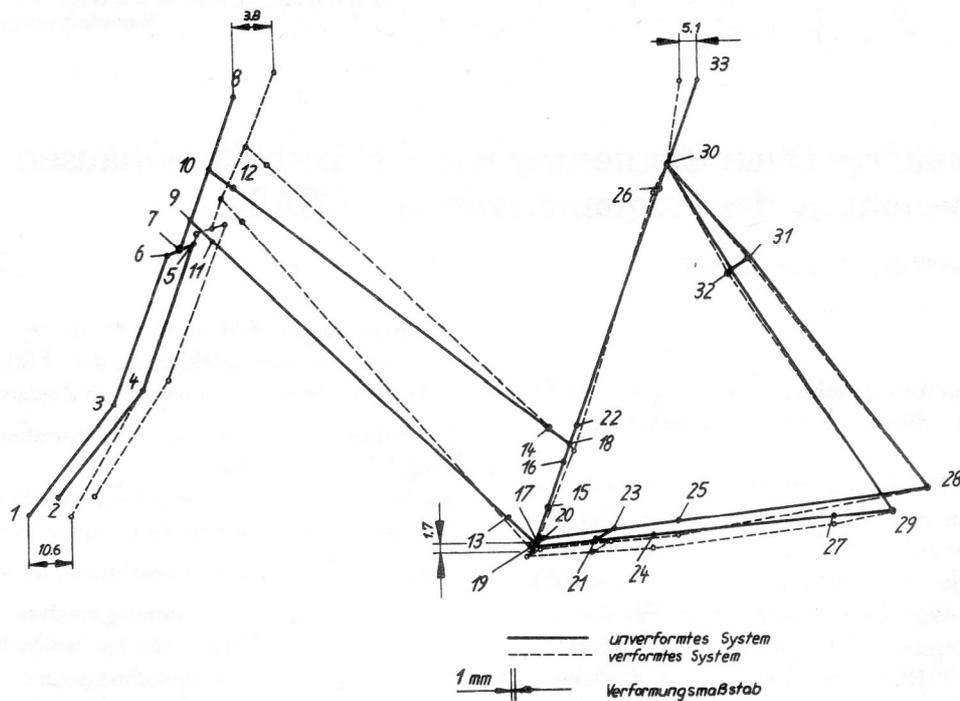
##### 4.1. Darstellung der Verformung als Grundlage zur Be- urteilung des fahrdynamischen Verhaltens

Die Fahrräder der Massenfertigung sind nicht mit geson-  
derten Federelementen zur Aufnahme der Reaktions-  
kräfte des Straßenprofils ausgerüstet, nur der Sattel und

die Bereifung gewährleisten einen gewissen Sitzkomfort.  
Die tragenden Elemente einschließlich Laufräder funk-  
tionieren gleichzeitig als Federelemente. Für den Radler ist  
deshalb die Rahmenstabilität ein wesentliches Merkmal  
zum fahrdynamischen Verhalten in Fahrsituationen mit  
höchster Beanspruchung. Die errechneten Verformungen  
des Rahmens werden grafisch dargestellt und erlauben  
es, für die unterschiedlichen Beanspruchungszustände  
Rückschlüsse auf die Fahrdynamik zu ziehen.



**Bild 5**  
Verformung des Herrenrahmens, geschweißt, Fahrzyklus Not-  
bremsen



**Bild 6**  
Verformung des Damenrahmens, geschweißt, Fahrzyklus Notbremsen

#### 4.2. Grafische Darstellung der Verformung für geschlossene und offene Fahrradrahmen

Bei der Notbremsung auf trockener Straße federt die Gabel des geschlossenen Rahmens (Bild 5) um 11 mm durch. Der Trapezrahmen selbst erleidet nur eine geringe Verformung.

Beim offenen Rahmen erkennt man bei der gleichen Fahr-situation eine deutliche Verformung des Rahmens, die gleichermaßen mit entsprechend höheren Spannungen verbunden ist (Bild 6).

Die Analyse des Mixterahmens zeigte die erwünschte stabilisierende Wirkung der zwei Oberrohre. Während beim traditionellen Tourenrahmen eine außermittige Belastung (Aufsteigesituation, Lastfall 7) eine merkliche Torsion hervorruft (seitliche Verschiebung der Lagerung des Kurbeltriebes um 2,7 mm), war diese beim Mixterahmen um ein vielfaches geringer (seitliche Verschiebung 0,8 mm). Ohne aufwendigen Musterbau und Messungen konnte damit der Nachweis zur Stabilitätsverbesserung erbracht werden.

#### 5. Zusammenfassung

Mit dem Programmsystem COSAR wurden Fahrradrahmen einer rechnerischen Betrachtung hinsichtlich ihres Spannungs- und Verformungsverhaltens unterzogen. Insgesamt wurden 7 charakteristische Bauformen in die Rechnung einbezogen. Dabei zeigte es sich, daß der Einsatz moderner Berechnungsverfahren auch bei der Zweiradentwicklung sinnvoll und vorteilhaft ist. Durch ihre Anwendung konnte die Entwicklungszeit für zwei Fahrradkonstruktionen beträchtlich verkürzt werden; zum anderen wurde es möglich, durch Variantenuntersuchungen innerhalb kurzer Zeit optimale Lösungen für die Rahmengestaltung zu finden. Für

die Bewältigung der Aufgabe wurden ebenfalls Verformungsbilder genutzt, die in sehr plastischer Form Auskunft über das Stabilitätsverhalten des Fahrradrahmens geben.

Als weiteres Ergebnis für zukünftige Untersuchungen an Fahrrädern wurden 5 Einheitslastfälle abgeleitet, die die relevanten Fahr-situationen (aufsteigen, beschleunigen, rollen, bremsen) beinhalten.

#### LITERATUR

- [ 1 ] Statistisches Jahrbuch der Deutschen Demokratischen Republik. Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik Berlin.
- [ 2 ] Bäte, R.: Ermittlung von Grenzlasten an einzelnen Fahrradtypen bei Dauerbeanspruchung. TU Dresden, Sektion Grundlagen des Maschinenwesens, 1983, unveröffentlicht.
- [ 3 ] Gubsch, G.: Betriebsfestigkeitsuntersuchungen am Universalfahrrad. IFL-Bericht Nr. 600-3/84, Dresden 1984, unveröffentlicht.
- [ 4 ] Nutzerhandbuch COSAR/84. Technische Hochschule „Otto von Guericke“, Sektion Maschinenbau, Wissenschaftsbereich Festkörpermechanik.
- [ 5 ] Kutta, A.: Berechnung von geschweißten Touren- und Sportfahrradrahmen. Diplomarbeit, Technische Hochschule „Otto von Guericke“, Sektion Maschinenbau, Magdeburg 1986.
- [ 6 ] Lehmann, H.: Rahmenberechnung eines Tandems. Diplomarbeit, Technische Hochschule „Otto von Guericke“, Sektion Maschinenbau, Magdeburg 1985.

Anschrift der Verfasser:

Dr. sc. techn. Helmut Horeschi  
TU „Otto von Guericke“  
Sektion Maschinenbau  
PSF 124  
Magdeburg  
3010

Dipl.-Ing. Dieter Schäfer  
VEB Mifa-Werk Sangerhausen  
Kyselhäuser Str. 23  
Sangerhausen  
4700