

## INNOVATIVE VERBINDUNGSSTANGE FÜR HOCHLEISTUNGSMOTOREN

### Vorbemerkung

Die vorliegende Übung ist in Anlehnung an eine Fallstudie entstanden, die von Gaetano Cascini und Francesco Saverio Frillici für SCAM srl (Italien) im Sommer 2006 durchgeführt wurde. Einige Details wurden für diese Übung außer Acht gelassen.

### Einleitung

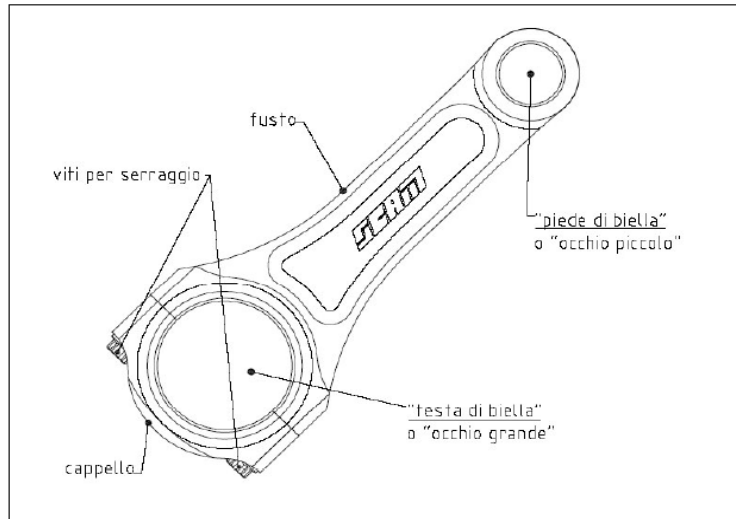
Eine Verbindungsstange für Viertakt-Motoren besteht im Prinzip aus drei Teilsystemen (Abb. 1): dem Schaft mit einem „kleinen Auge“ am engen Ende wo der Kolbenbolzen angesetzt wird; dem „Hut“, einem halbkreisförmigen Teil, das zusammen mit dem breiten Ende des Schafts das „große Auge“ bildet, wo die Verbindungsstange an der Motorwelle befestigt wird sowie 2 Schrauben die den Hut am Schaft fixieren.

Eine Verbindungsstange unterliegt Ermüdungsbeanspruchungen aufgrund von wechselnder Belastung und Gasdruck in der Verbrennungskammer. Daher müssen die Schrauben eine sich stark ändernde Belastung aushalten und stellen in Hochleistungs-motoren (z.B. Formel 1) eine der schwächsten Stellen des gesamten Systems dar.

In Form von Spezialstahl und Titanlegierungen, die stark und wenig brüchig sind, konnten im letzten Jahrzehnt deutliche Verbesserungen erzielt werden. Ein Nischenmarkt für Schrauben aus Spezialstahl für extreme Belastungen hat sich entwickelt, den sich 2 bis 3 Hauptproduzenten weltweit teilen. Diese können praktisch willkürlich den Preis der Schrauben festlegen.

Ein kleiner Mitbewerber, der Wellen und Verbindungsstangen für Rennmotoren produziert, ist einfach nicht in der Lage, exklusive Lieferverträge mit den oben erwähnten Schraubenproduzenten abzuschließen, weil das Produktionsvolumen zu gering ist. Zudem haben die größten Mitbewerber bessere Chancen, exklusive Lieferverträge auszuhandeln. Daher ist es notwendig, die Struktur der Verbindungsstange radikal zu verändern.

Es muss erwähnt werden, dass es aufgrund von externen Auflagen nicht möglich ist, eine Verbindungsstange aus einem einzigen Stück zu fertigen, die auf eine mehrteilige Welle aufgesetzt wird. Aufgrund der speziellen Bestimmung der Verbindungsstange ist die Gewichtsreduktion das größte Erfordernis.



**Abb. 1 – Verbindungsstange für Viertakt-Motoren.**

Weil das System sehr einfach ist, liefert eine funktionale Analyse keine klare Aussage über die Konstruktion jedes Details. Dennoch können durch Beachtung der Konstruktionsparameter einige Widersprüche identifiziert werden. Eine Schritt-für-Schritt ARIZ Analyse wurde wie folgt durchgeführt.

### **ARIZ-85C, Schritt 1.1**

- TC-1: Wenn die Verbindungsstange mit kleinen/leichten Schrauben ausgestattet wird, die den Schaft mit dem Kopfteil verbinden, sind die Schrauben Beanspruchungen ausgesetzt, die ihre maximale Kräfte übersteigen.
- TC-2: Wenn die Verbindungsstange mit Schrauben ausgestattet wird, die die auf die Verbindungsstange wirkenden Beanspruchungen aushalten, übersteigt ihr Gewicht den maximal zulässigen Wert.

### **ARIZ-85C, Schritt 1.2**

Die technischen Widersprüche oben betreffen folgendes sich widersprechende Paar:

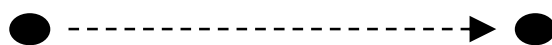
- Instrument: die Schraube(n)
- Produkt: die Verbindungsstange

### **ARIZ-85C, Schritt 1.3**

Abb. 2 zeigt die Konflikte TC-1 und TC-2, wobei das Gewicht der Schrauben als ein eigener Nachteil dargestellt wird, obwohl es besser als eine Belastung (Nachteil) für das ganze System dargestellt sein sollte.

**Schraube**

**Verbindungsstange**



**Abb. 2a – ARIZ-85C - Schritt 1.3: TC1**

## Schraube                      Verbindungsstan-

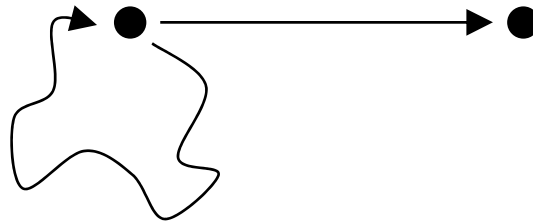


Abb. 2b – ARIZ-85C - Schritt 1.3: TC2

### **ARIZ-85C, Schritt 1.4**

TC-1 wurde als jene Seite des Widerspruchs ausgewählt, die bearbeitet werden sollte, weil sie dem Idealzustand näher ist (kein Gewicht).

### **ARIZ-85C, Schritt 1.5**

Die Intensivierung dieses Widerspruchs führt zur Eliminierung der Schrauben: Wenn die Verbindungsstange mit den leichtesten/kleinsten Schrauben ausgestattet wird, z.B. überhaupt keine Schraube, die den Schaft mit dem Hut verbindet, können die Schrauben keinerlei Belastungen aushalten.

### **ARIZ-85C, Schritt 1.6**

Das Modell des Problems kann daher folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Das sich widersprechende Paar sind die Schrauben und die Verbindungsstange;
- Die fehlende Schraube macht das System nicht schwerer, kann aber keinen Belastungen standhalten;
- Es muss ein/e X-Komponente/Bereich/Eigenschaft gefunden werden, die/der die auf die Verbindungsstange wirkenden Belastungen tragen kann, ohne der Verbindungsstange aber zusätzliches Gewicht hinzuzufügen.

### **ARIZ-85C, Schritt 1.7**

Das oben beschriebene Problem kann mittels der „Erfinderischen Standards“ behandelt werden.

In der intensivierten Form des Konflikts gibt es ein unvollständiges S-F Model mit nur einer Substanz (der Verbindungsstange). Daher sollte Standard 1-1-1 angewandt werden.

Aufgrund der Art des Systems und der Unmöglichkeit, die Struktur radikal zu verändern, sollte eine Wechselwirkung mit einem Mechanischen Feld beibehalten werden.

Die Möglichkeit, die Schrauben zu eliminieren, indem Hut und Schaft aneinander fixiert werden (z.B. durch schweißen) wurde in Erwägung gezogen, schlussendlich aber aufgrund anderer Anforderungen des Systems verworfen.

### **ARIZ-85C, Schritt 2.1**

Der Handlungsbereich, indem es einen Konflikt gibt, ist das „große Auge“, d.h. der Teil der Verbindungsstange, der mit der Motorwelle verbunden werden soll.

## **ARIZ-85C, Schritt 2.2**

Die Intervalle, wenn die Verbindungsstange Zugbelastungen ausgesetzt ist ( $T1'$ ), die Zeit, wenn sie Druckbelastungen ausgesetzt ist ( $T1''$ ) und die Zeit wenn die Verbindungsstange an die Motorwelle angebracht wird ( $T2$ ), stellen die Handlungszeit dar.

## **ARIZ-85C, Schritt 2.3**

Die wesentlichen internen Ressourcen sind:

- Systemressourcen: Schaft, Hut, Schrauben in deren Formen, geometrische Position/Orientierung, Material etc.
- Subsystemressourcen: das kleine Auge, der Kopf der Schrauben, das Gewinde der Schrauben;
- Supersystemressourcen: Kolbenbolzen, Kolben, Motorwelle.

## **ARIZ-85C, Schritt 3.1**

IFR-1: Eine X-Komponente verbindet Schaft und Hut der Verbindungsstange unter Zug- ( $T1'$ ) und Druckbelastungen ( $T1''$ ) ohne das System zu kompliziert zu machen und ohne negative Nebeneffekte (insbesondere einer Gewichtserhöhung), indem sie ein stabiles geschlossenes Auge bildet, das mit der Motorwelle verbunden wird. Die Verbindungsstange behält dabei ihre Fähigkeit, Kräfte zu übertragen.

## **ARIZ-85C, Schritt 3.2**

Das ideale Endergebnis kann somit intensiviert werden, indem neue Substanzen/Bereiche vermieden werden und die in Schritt 2.3 identifizierten Ressourcen als X-Komponente angewandt werden.

Das IFR kann dementsprechend umformuliert werden:

- Die Schraubengröße/-form/-position verbindet Schaft und Hut der Verbindungsstange unter Zug- ( $T1'$ ) und Druckbelastungen ( $T1''$ ), ohne das zulässige Gewicht zu überschreiten, indem ein stabiles geschlossenes Auge gebildet wird, das mit der Motorwelle verbunden wird. Die Verbindungsstange behält dabei ihre Fähigkeit, Kräfte zu übertragen.
- Der Schaft/Hut ist so geformt, dass leichte Schrauben eingesetzt werden können, die den Schaft und den Hut der Verbindungsstange unter Zug- ( $T1'$ ) und Druckbelastungen ( $T1''$ ) verbinden können, indem ein stabiles geschlossenes Auge gebildet wird, das mit der Motorwelle verbunden wird. Die Verbindungsstange behält dabei ihre Fähigkeit, Kräfte zu übertragen.

## **ARIZ-85C, Schritt 3.3**

Auf Makroebene können die physischen Widersprüche durch die Analyse der präferierten Lage/Wert jedes einzelnen physischen Parameters der oben dargestellten Ressourcenliste ausgedrückt werden.

Aus mehreren wurde der folgende physische Widerspruch ausgewählt:

- Die Schraube sollte während  $T1'$  und  $T1''$  rechtwinklig zur Achse der Verbindungsstange angebracht sein, um nicht Ermüdungserscheinungen ausgesetzt zu sein; und die Schraube sollte parallel zur Achse der Verbindungsstange angebracht sein, um Schaft und Hut der Verbindungsstange zu verbinden und deren Kräfte richtig zu übertragen.

## **ARIZ-85C, Schritt 3.4**

Die physischen Widersprüche auf Mikro-Ebene können folgendermaßen formuliert werden: Während T1' und T1'' sollte es Kraft übermittelnde Teile (in diesem Fall sollten die Teile eines Bereichs, nicht nur einer Substanz, berücksichtigt werden) geben, damit eine rechtwinklig zur Achse der Verbindungsstange angebrachte Schraube den Schaft und den Hut der Verbindungsstange verbinden kann; und es sollte keine Kraft übertragenden Teile geben, damit Belastungen auf die Schraube verhindert werden.

## **ARIZ-85C, Schritt 3.5**

Das große Auge der Verbindungsstange sollte Kraft übertragende Teile beinhalten, damit eine rechtwinklig zur Verbindungsstange angebrachte Schraube den Schaft und den Hut der Verbindungsstange verbindet ohne Belastungen auf die Schraube anzuwenden.

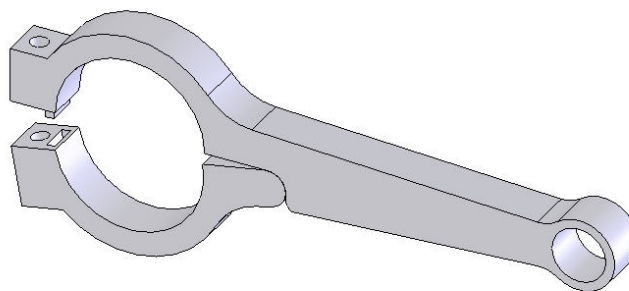
## **ARIZ-85C, Schritt 3.6**

Die letzte Formulierung der physischen Widersprüche erzeugt eine konzeptionelle Lösung, sogar wenn kein innovatives Prinzip angewandt wird, lediglich durch die Übersetzung von IFR-2 in eine Struktur. Die Verbindungsstange wird umgeformt, sodass die Passfläche von Schaft und Hut parallel zu ihrer Achse ist. Folglich verbindet eine Schraube, die rechtwinklig zur Achse der Verbindungsstange angebracht ist, Schaft und Hut sind aufgrund ihrer Platzierung rechtwinklig zur Krafrichtung keinen Belastungen ausgesetzt. Daher können traditionelle Stahllegierungen so angepasst werden, dass sie die Größe der Schraube sogar reduzieren.

Die Lösung ist fast dargestellt, jedoch muss eine noch klarere Definition der Kraftübertragung zwischen großem und kleinem Auge aufgezeigt werden.

Bei dem Ziel, die Schraube nur einer statischen normalen Belastung auszusetzen und Schiebung (statisch und alternierend!!) zu vermeiden, müssen wir etwas Neues ins System einbringen.

Ein mechanischer Konstrukteur wird schnell verschiedenste mögliche Strukturen entwickeln, die diese Anforderungen erfüllen. In unserem Fall wurde die Einarbeitung eines Gelenks vorgeschlagen, wie in Abb. 3 dargestellt ist.



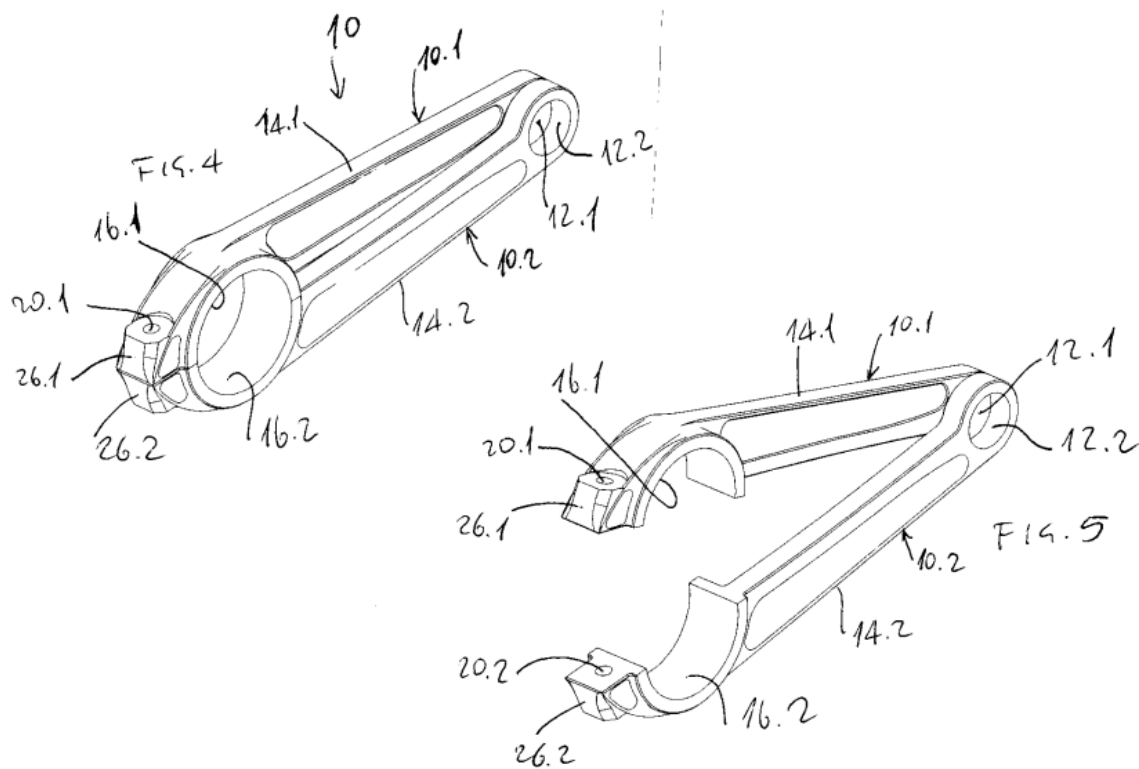
**Abb. 3 – Erstlösung: Die Schraube fixiert das große Auge der Verbindungsstange, ist aber keinen Belastungen ausgesetzt.**

Die Einarbeitung einer neuen Substanz (des Gelenks) erhöht die Komplexität des Systems. In anderen Worten sollte das Gelenk da sein, um die Kraft zwischen großem Auge und dem Rest der Verbindungsstange zu übertragen, aber das Gelenk sollte nicht da sein, um die Komplexität des Systems zu reduzieren.

Mit derselben Logik wie in Schritten 3.1. und 3.2. wird nicht eine neue Substanz eingearbeitet, sondern wird vorgeschlagen, verfügbare Ressourcen anzuwenden.

Unter den in Schritt 2.3 identifizierten verfügbaren Ressourcen, kann der Bolzen des Kolbens als die Achse des Gelenks verwendet werden, was es den beiden Teilen der Verbindungsstange bei der Anbringung an die Motorwelle ermöglicht, sich zu drehen.

Das Ergebnis ist eine Anpassung der oberen Konstruktion der Verbindungsstange wie in Abb. 4.



**Abb. 4 – Lösung, die sich durch eine verstärkte Nutzen der vorhandenen Ressourcen ergeben hat. Die neue Verbindungsstange ist 12% leichter als das Original und die Schrauben sind statischen Belastungen statt Zug- und Druckbelastungen ausgesetzt.**

## Schlussfolgerungen

Die finale Lösung ermöglichte die Entwicklung einer neuen Generation von Verbindungsstangen für Rennmotoren: bei einem nur etwas komplizierterem Fertigungsprozess (ein vernachlässigbarer Nachteil in diesem speziellen Feld), wurde ein doppelter Vorteil erzielt: Die neue Verbindungsstange ist 12% leichter als das Original aufgrund der reduzierten Masse des Schafts, die zur Halterung der Schrauben benötigt wird; zudem können traditionelle Stahlschrauben statt Schrauben mit spezieller Legierung angewandt werden, weil es keine Ermüdungsbeanspruchungen gibt.