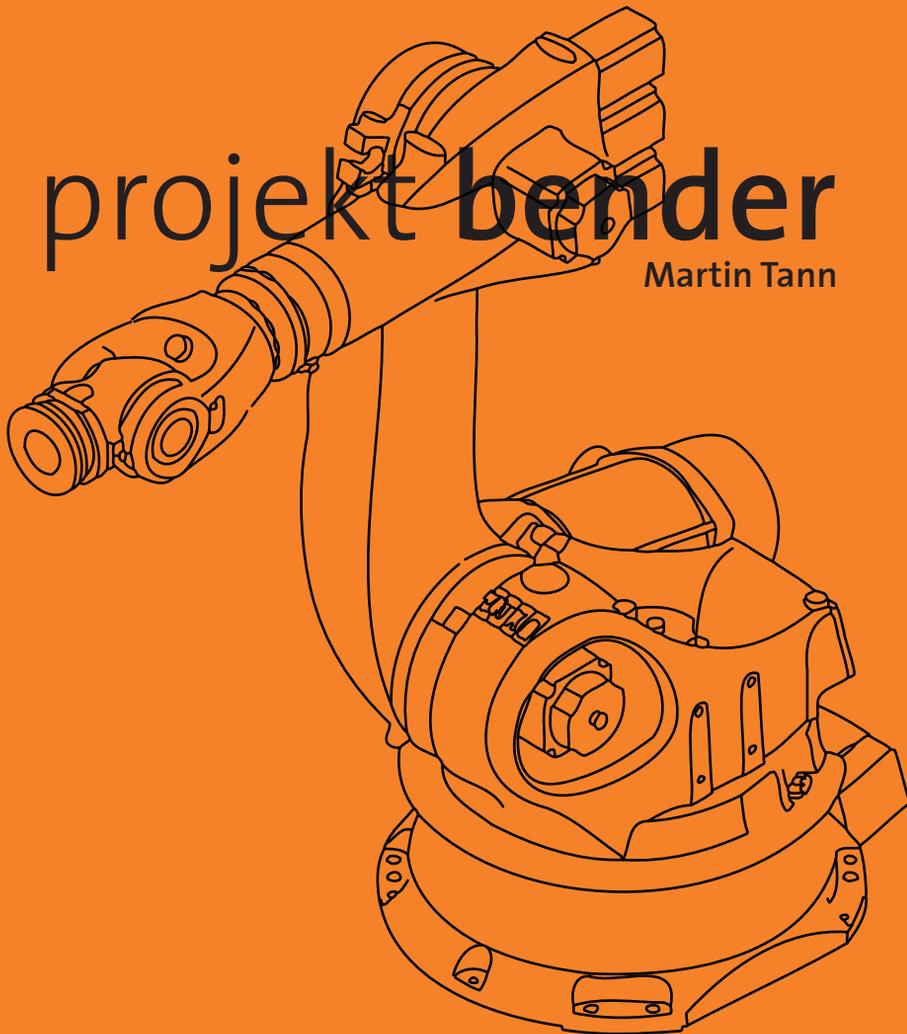


projekt bender

Martin Tann



projekt **bender**

ETH Zürich
Professur für CAAD
Prof. Dr. Ludger Hovestadt
www.caad.arch.ethz.ch

in Zusammenarbeit mit

ETH Zürich
Professur für Architektur und Digitale Fabrikation
Prof. Fabio Gramazio, Prof. Matthias Kohler
www.dfab.arch.ethz.ch

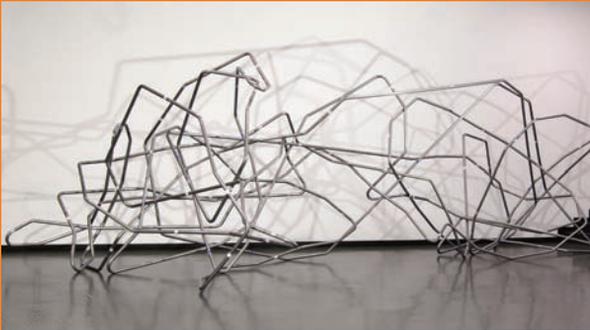
Planung, Idee und Ausführung: Nachdiplomstudent Dipl.-Ing. Martin Tann

entstanden im Rahmen des Nachdiplomstudienganges
«Master of Advanced Studies in Architecture,
Specialization in Computer Aided Architectural Design»
an der Professur für CAAD

Zürich, Dezember 2006

INHALT

- 07 1.EINLEITUNG
- 09 2.ABLAUF
 - 11 3.ÜBERBLICK ROHRBIEGEVERFAHREN
 - 3.1 Pressbiegeverfahren
 - 3.2 Drei-Rollen-Biegeverfahren
 - 3.3 Kompressionsbiegeverfahren
 - 3.4 Rotationszugbiegeverfahren
 - 3.5 Neuere Entwicklungen
 - 19 4.ROBOTER KUKA KR 150 L110
 - 4.1 Versuchsanlage - D FAB ARCH
 - 4.2 Aufbau
 - 4.3 Vorteile des Roboters
 - 25 5.PLANUNG VERSUCHSAUFBAU
 - 5.1 Erste Schritte: Übersetzen bestehender Methoden auf den Roboter
 - 5.2 Biegeverfahren für Roboter?
 - 5.3 Konstruktion der optimalen Maschine
 - 5.4 Realisierbarkeit
 - 5.5 Detaillierung der Idee
 - 5.6 Ausarbeitung
 - 5.7 Realisierter Aufbau
 - 47 6.VORBEREITUNG UND AUFBAU DER ANLAGE
 - 6.1 Produktion der Werkzeuge
 - 6.2 Aufbau und Einrichten der Peripherie
 - 6.3 Eingabe von Greifer und Basis
 - 55 7.MÖGLICHKEITEN DER ROBOTERSTEUERUNG
 - 57 8.DATENGENERIERUNG
 - 8.1 Prinzip
 - 8.2 VektorScript
 - 8.3 Vorstellung Skript
 - 69 9.BIEGEN
 - 9.1 Test Maschine + Feineinstellung
 - 9.2 Materialtests + erste Biegeversuche
 - 9.3 Start der Produktion
 - 9.4 Bewährungsprobe: Biegen «richtiger» Projekte
 - 81 10.EPILOG
 - 83 DANK
 - 85 APPENDIX
 - Abstract
 - Quellennachweise
 - Anlage: Datenträger



bend

Group Thesis des MAS-Kurs 2005-06

Pavillon 1: Schwarmsystem (Frank Thesseling)

Raumstruktur generiert durch intelligente Partikel



bend

Group Thesis des MAS-Kurs 2005-06

Pavillon 2: Raumnetzwerk (Benjamin Dillenburger)

Auf Voronoi-Diagrammen basierende zelluläre
Struktur



bend

Group Thesis des MAS-Kurs 2005-06

Pavillon 3: Raumschleifen (Tobias Wendt)

Konfigurierbare Raumstruktur

1.EINLEITUNG

Die Professur für CAAD des Departements Architektur der ETH Zürich wendet aktuelle Informationstechnologien in der architektonischen Praxis an. Der Fokus liegt dabei auf dem computergestützten architektonischen Entwurf und seiner automatisierten Produktion durch computergesteuerte Maschinen. Dies bildet gleichzeitig auch den Ausbildungsschwerpunkt für den jährlich von der Professur organisierten Nachdiplomstudiengang «Master of Advanced Studies in Architecture, Specialization in Computer Aided Architectural Design». Zum Abschluss dieses zweisemestrigen Aufbaustudiums wird von jedem Kursteilnehmer eine Einzelarbeit angefertigt sowie mit der gesamten Gruppe ein Projekt bearbeitet, das üblicherweise aus dem Bau eines Pavillons besteht. Die Gruppe dieses Jahrgangs entschied sich relativ früh für die Verwendung von gebogenen Rohren für ihr Projekt. Dabei entstand «bend» - drei vollständig parametrisierte Raumstrukturen, die durch eigens mit JAVA und VectorScript geschriebene Programme generiert und dann auf herkömmlichen CNC-Rohrbiegemaschinen gefertigt wurden.

Inspiziert vom Thema der Gruppenarbeit stand für mich bald fest, in der Einzelarbeit zu untersuchen, inwieweit sich ein CNC gesteuerter Roboter eignet, um Metallrohre mit geringen Durchmessern zu biegen. Dabei konnte in kleinem Maßstab die von der Professur für CAAD propagierte «Digitale Produktionskette» in vollem Umfang durchgespielt werden. Dieses Prinzip beschreibt einen unterbrechungsfreien digitalen Prozess vom Entwurf über die Konstruktion zur Produktion. Die einzelnen Schritte sind programmierte Einheiten, die über Schnittstellen miteinander verbunden sind.

Nach einer Analyse bereits existierender Rohrbiegeverfahren, sollte untersucht werden, welche Methode sich am besten auf einen Roboter adaptieren lässt bzw. ob es neue Möglichkeiten gibt, damit Rohre dreidimensional im Raum zu biegen. Dabei sollte geprüft werden, welche Vor- und Nachteile das Umformen der Rohre mit einem 6-Achs-Roboter gegenüber herkömmlichen CNC-Biegemaschinen hat und ob es eventuell sogar ganz neue Möglichkeiten bietet.

2.ABLAUF

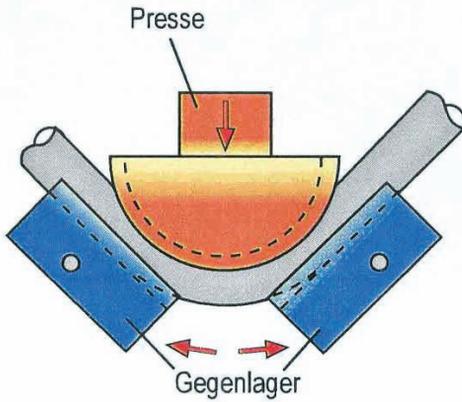
Beginnend mit einem kurzen theoretischen Teil sollte recherchiert werden, welche Biegeverfahren in der Industrie heute üblich und wie diese aufgebaut sind. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Analyse der Funktionsweisen, d.h. dem Herausfiltern der den einzelnen Methoden zu Grunde liegenden Prinzipien. Ferner sollte in Erfahrung gebracht werden, welche neuen Entwicklungen und Bestrebungen es in der Rohrbiegeindustrie gibt und inwiefern das Biegen mit Robotern schon angewandte oder gewünschte Praxis ist.

Im zweiten Teil konnten dann erste Überlegungen angestellt werden, wie die vorgefundenen Biegeverfahren auf einen 6-Achs-Roboter adaptiert werden könnten. Wichtig war erst einmal unterschiedliche Ansätze zu finden, diese dann zu bewerten und ggf. auszusortieren oder weiter zu verfolgen. Da der Einsatz eines vielgelenkigen Roboters auf diesem Gebiet noch nicht alltäglich ist, sollten auch ganz neue Möglichkeiten und Prinzipien des Biegevorgangs in Betracht gezogen werden. Das heißt konkret, welche Stärken und Schwächen hätte das Arbeiten mit einem solch neuen Verfahren?

Eines der angedachten Biegeverfahren wurde dann ausgewählt und weiter entwickelt. Ziel war es eine eigenständige Biegeeinheit zu konstruieren, mit der praktische Versuche durchgeführt werden sollten. Dazu wurde die Anordnung der Maschine sowie der Ablauf des Biegens geplant und eigens entwickelte Werkzeuge gefertigt.

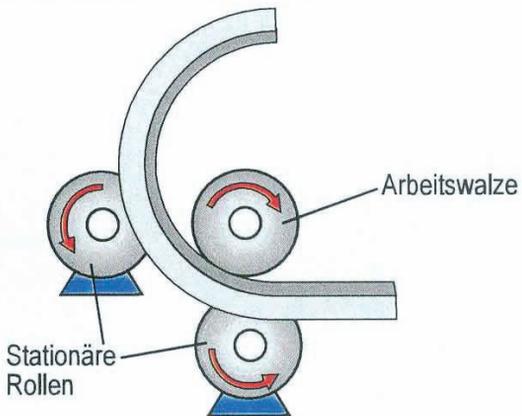
Außerdem galt es zu überlegen, wie gezeichnete oder generierte lineare Strukturen vom Computer auf die Biegemaschine übersetzt werden können. Dazu wurde in der Programmiersprache VektorScript ein Algorithmus entwickelt, der bestehende Polygone in für den Roboter lesbare Biegedaten übersetzt.

Im praktischen Teil wurden die Entwicklungen dann erfolgreich getestet und in einzelnen Versuchsreihen weiterentwickelt. Abschließend konnten einige «richtige» Projekte verwirklicht werden, woraus eine Anzahl an Objekten aus gebogenem Rohr entstand.



Pressbiegen

Prinzipische Darstellung des Pressbiegens
© TRACTO-TECHNIK GmbH



3-Rollen-Biegen

Prinzipische Darstellung des 3-Rollen-Biegens
© TRACTO-TECHNIK GmbH

3. ÜBERBLICK ROHRBIEGEVERFAHREN

Im Wesentlichen können die gebräuchlichsten Rohrbiegeverfahren in vier unterschiedliche Prinzipien eingeteilt werden:

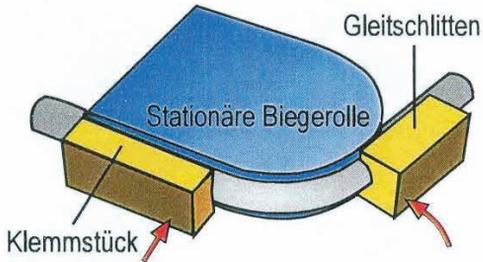
- das Pressbiegen
- das Drei-Rollen-Biegen
- das Kompressionsbiegen sowie
- das Rotationszugbiegen

3.1 Pressbiegeverfahren

Beim Pressbiegen wird das Biegewerkzeug mit dem eingearbeiteten Biegeradius manuell oder hydraulisch an zwei Gegenrollen gepresst. Diese Bewegung zwingt das zwischen Werkzeug und Gegenrollen eingelegte Rohr zur Biegung um den Radius. Da die Rohre nicht von innen gestützt werden können, ist dieses Verfahren nur für dickwandige Rohre und große Biegeradien geeignet.

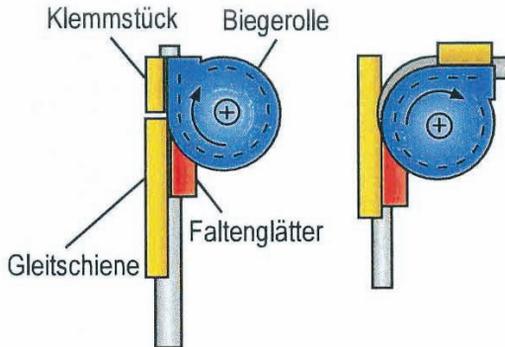
3.2 Drei-Rollen-Biegeverfahren

Drei-Rollen-Biegen wird angewandt, um Werkstücke mit großen Biegeradien herzustellen. Das Verfahren ist dem Pressbiegen ähnlich, doch rotieren die Arbeitswalze sowie die beiden stationären Gegenwalzen und formen dadurch den Bogen.



Kompressionsbiegen

Prinzipskizze Kompressionsbiegen
© TRACTO-TECHNIK GmbH



Rotationszugbiegen

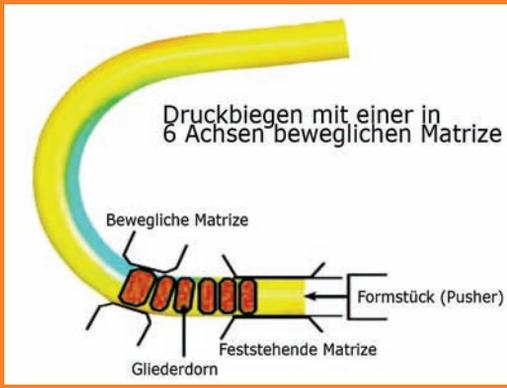
Prinzipskizze Rotationszugbiegen
© TRACTO-TECHNIK GmbH

3.3 Kompressionsbiegeverfahren

Beim Kompressionsbiegen wird das Rohr zwischen einen Gleitschlitten und eine stationäre Biegerolle geklemmt. Durch Rotation des Gleitschlittens um die Biegerolle wird das Rohr auf deren Radius gebogen.

3.4 Rotationszugbiegeverfahren

Beim Rotationszugbiegen wird das Rohr in die Biegemaschine eingelegt und mechanisch oder hydraulisch zwischen der Biegerolle und dem Klemmstück fixiert. Durch Rotation beider Werkzeuge um die Biegeachse wird das Rohr auf den Radius der Biegerolle gebogen. Eine Gleitschiene (Gegenlager) dient zur Aufnahme der während des Umformprozesses entstehenden Querkräfte und stützt das gerade Rohrende von außen ab. Kommen zusätzlich Biegedorn und Faltenglätter zum Einsatz (Dornbiegen), so kann selbst bei dünnwandigen Rohren und engen Biegeradien eine hohe Werkstückqualität erzielt werden.



HexaBend - Funktionskizze
© Fraunhofer IWU



HexaBend - Ansicht Maschine
© Fraunhofer IWU

3.5 Neuere Entwicklungen

HEXABEND

Mit der vom Chemnitzer Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU in Zusammenarbeit mit der PEM Automatisierungstechnik Schwarzenberg GmbH entwickelten Umformanlage können Rohre und Profile frei gebogen werden. Die Besonderheit der Anlage laut IWU: Mit ihr können sowohl kleine als auch sehr große Radien geformt werden. Darüber hinaus ist es möglich, nicht nur Biegeradius an Biegeradius zu reihen, sondern die Biegeumformung des Profils dreidimensional entlang einer beliebigen Raumkurve durchzuführen.

Das Rohr wird dazu mit einem Schiebeelement, genannt Pusher, durch ein feststehendes Biegewerkzeug hindurch in eine in sechs Achsen bewegliche Matrize hinein geschoben. Die Biegeform ist nicht in einem Werkzeug abgebildet, sondern wird durch die vorgegebene Bahnbewegung dieser Matrize bei gleichzeitigem Vorschub des Profils erzeugt. Der Name »HexaBend« wird aus den sechs hydraulisch längenveränderlichen Streben abgeleitet, die die Bewegung des Biegewerkzeuges erzeugen.



Prototypische Freiformbiegemaschine
© Michael Thalmer



Twister - Roboter an verschiedenen Biegeköpfen
© Rosenberger AG

FREIFORMBIEGEN

In einer Forschungsarbeit von Michael Thalmeir wird das Biegen schlanker Werkstücke unter Anwendung des Verfahrens der «Freien räumlichen Umformung» untersucht. Dabei kann die Endgestalt des Werkstücks ohne ein formgebendes Werkzeug aufgeprägt werden, so dass seine Oberfläche unbeschädigt bleibt. Die Umformung erfolgt über die geeignete Bewegung der beiden eingespannten Werkstückenden, wobei mit einem wandernden Fließbereich die gewünschte Verformung über die Werkstücklänge erzeugt wird. Zur praktischen Anwendung und Erprobung wurde eine Maschine mit sieben Antrieben konstruiert. Das Verfahren ist vor allem für Rohre und Stangen mit rotationssymmetrischen oder quadratischen Querschnitten geeignet. Werkstücke mit beliebigem Querschnitt können um die Achse mit dem kleineren Flächenträgheitsmoment stabil umgeformt werden.

TWISTER

Das Unternehmen Rosenberger AG entwickelte zusammen mit der KUKA Roboter GmbH die Biegeeinheit TWISTER, ein Biegesystem in Verbindung mit einem sechsachsigen Roboter. Dieser übernimmt das Handling der Rohre und fährt, je nach Auftrag, zwei bis sechs Biegeköpfe an, die für Rohrdurchmesser von 20 bis 60 Millimeter ausgelegt sind. Auf bis zu drei Biegeebenen pro Kopf erzeugt der Sechssachser dadurch verschiedene Bögen, Längen und Verdrehungen. Zur Aufnahme der Bauteile nutzt der Roboter teilespezifische, pneumatische Zangengreifer, die für die einzelnen Applikationen entwickelt werden und sich wechseln lassen.

Der KUKA KR 16 holt das jeweilige Rohr selbstständig an einer Vereinzlungsanlage ab, fährt die X-, Y- und Z-Koordinaten servogesteuert an, bedient die Biegeköpfe und verknüpft das Biegen, sofern es gewünscht ist, mit weiteren Prozessen wie beispielsweise Endumformungen.

Der erste TWISTER wurde an einen Automobilzulieferer verkauft. In diesem Pilotprojekt formte der Roboter eine Rohr-Schlauch-Rohr-Kombination mit angelöteten Befestigungselementen.



4.ROBOTER KUKA KR 150 L110

4.1 Versuchsanlage - D FAB ARCH

Für die praktischen Versuche konnte ein 6-Achs-Roboter der Firma KUKA vom Typ KR 150 L110 genutzt werden. Dieser ist Teil einer Versuchsanlage der Professur für Architektur und Digitale Fabrikation der Professoren Fabio Gramazio und Matthias Kohler und wurde freundlicherweise für die Tests zur Verfügung gestellt. In großer Zahl werden Roboter dieser Art genutzt für Arbeiten wie Schweißen und Montieren oder zum Aufbringen von Klebe-, Dicht- und Konservierungsstoffen. Doch mit seiner großen Kraft und einer Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,12\text{mm}$ ist der KR 150 L110 ideal geeignet für die Biegeversuche.



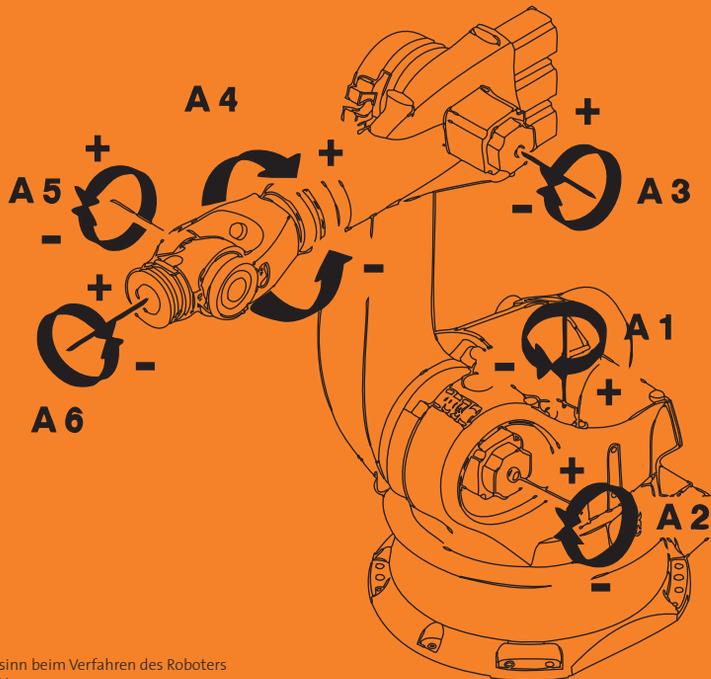
Versuchsanlage für Digitale
Fabrikation - vollständig flexible
Fertigungseinrichtung der Professur für
Architektur und Digitale Fabrikation an
der ETH Zürich

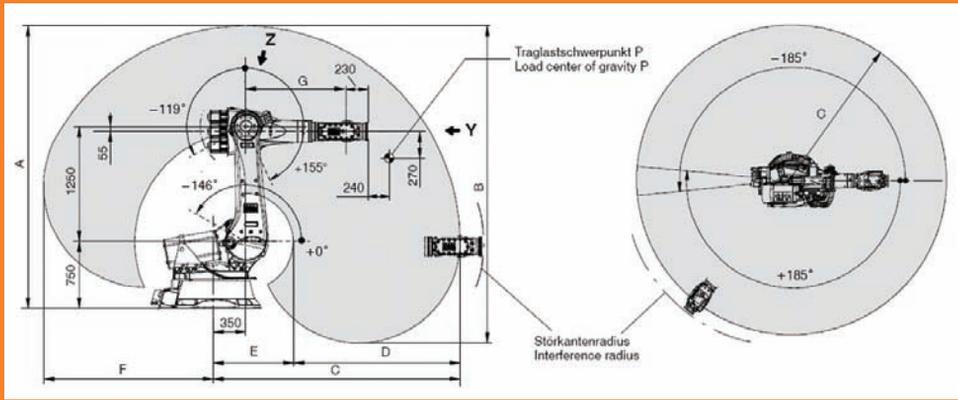


Die Linearinheit erhöht die Flexibilität des Roboters und vergrößert seinen Arbeitsraum.

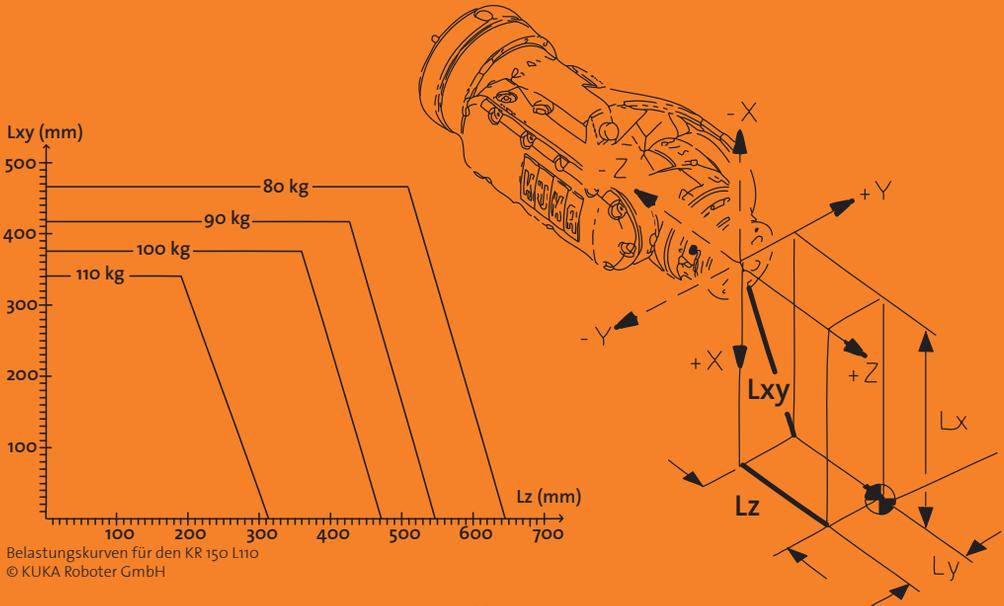
4.2 Aufbau

Der Roboter besteht aus einem Grundgestell, auf dem sich um eine senkrechte Achse das «Karussell» mit Schwinge, Arm und Hand dreht. Die Hand dient mit ihrem Anbauflansch der Aufnahme von Werkzeugen - in diesem Fall dem Rohrgreifer mit Biegerolle. Die insgesamt sechs Achsen ermöglichen dem Roboter eine extreme Bewegungsfreiheit sowie eine große Flächenabdeckung, welche durch eine Lineareinheit noch zusätzlich erweitert wird. Dies ist eine Art Schiene auf der sich der Roboter selbstständig bewegt und kann als siebte Achse gesehen werden. Die Länge der fahrbaren Strecke beträgt in diesem Fall etwa 7m - was den Arbeitsraum und die Flexibilität des Roboters noch einmal enorm erweitert.





Erreichbarer Arbeitsraum des Roboters - Ansicht und Aufsicht © KUKA Roboter GmbH



Belastungskurven für den KR 150 L110
© KUKA Roboter GmbH

4.3 Vorteile des Roboters

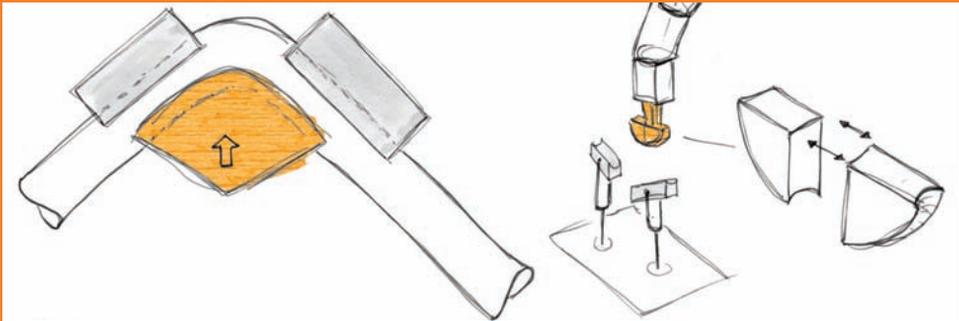
BEWEGLICHKEIT

Gegenüber herkömmlichen Biegemaschinen hat der Roboter einige Vorzüge, die hauptsächlich aus seiner großen Flexibilität resultieren. Die vielen beweglichen Achsen garantieren ihm eine Mobilität, die es ermöglicht, beliebige Punkte im Raum von verschiedenen Seiten und aus unterschiedlichen Winkeln anzufahren. Dies schafft Möglichkeiten, die konventionelle Biegemaschinen nicht bieten, da deren Aufbau sich zwar an verschiedene Rohrquerschnitte und Biegeradien anpassen lässt, der Biegevorgang selbst aber immer auf dieselbe Weise geschieht. Erweiterte Möglichkeiten bieten immerhin Maschinen, die es gestatten, das Rohr nicht nur auf eine festgelegte Seite, sondern nach links oder rechts zu biegen. Dies bewirkt, dass das Werkstück zwischen zwei Biegungen manchmal weniger rotiert werden muss und somit eventuelle Kollisionsprobleme reduziert werden. Das Biegen mit einem Roboter geht hier aber einen Schritt weiter, denn dieser kann den beweglichen, agierenden Teil des Biegesystems übernehmen und somit viel freier und flexibler auf das Werkstück reagieren. Der feststehende, starre Teil der Anlage kann minimiert werden, was zusätzlichen Raum und damit Möglichkeiten schafft. Dem Roboterarm ist es beispielsweise möglich bei einer etwaigen Kollision mit dem zu biegenden Rohr, den Biegepunkt aus einer anderen Stellung heraus anzufahren und das Problem damit buchstäblich zu umgehen.

Außerdem kann der Roboter nicht nur den Biegevorgang selbst, sondern auch andere Aufgaben rund um den gesamten Prozess übernehmen. So werden für den Vortrieb des Werkstücks sowie dessen Rotation keine weiteren Systeme mehr benötigt. Theoretisch kann sogar das Heranholen der Rohre und deren Platzierung in der Biegevorrichtung vom Roboter übernommen werden.

MAXIMALE LASTEN

Eine gewisse Einschränkung der Möglichkeiten bietet die zur Verfügung stehende Kraft des Roboterarms. Diese ist natürlich abhängig vom verwendeten Fabrikat und wird außerdem dadurch beeinflusst, wo sich der Angriffspunkt der entstehenden Kräfte befindet. Im Falle eines KUKA KR 150 L110 beträgt die maximal anhängbare Masse 110kg. Das Schaubild links zeigt, wie sich dieser Wert verringert, wenn die Kräfte weit vor dem Anbauflansch (Strecke L_z) oder nicht mehr zentrisch, sondern seitlich verschoben zur senkrecht durch den Flansch laufenden Achse wirken (Strecke L_y).



Skizzierte Überlegungen zum Pressbiegen (orange Teile werden vom Roboter geführt)

5.PLANUNG VERSUCHSAUFBAU

5.1 Erste Schritte: Übersetzen bestehender Methoden auf den Roboter

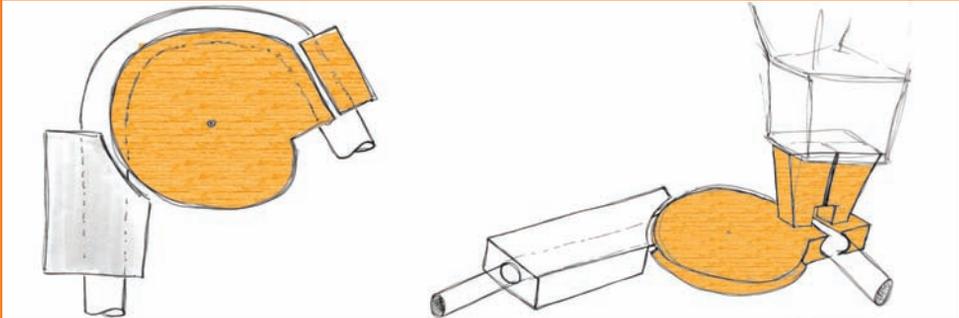
PRESSBIEGEN

Das Pressbiegen ist ein relativ einfaches Verfahren, das gut mit einem Roboter durchgeführt werden könnte. Dieser würde das Rohr packen, in einer Vorrichtung positionieren und dann die Funktion der Presse übernehmen. Das am Anbauflansch angebrachte Werkzeug müsste in diesem Fall mit einer Art Greifer sowie einem Biegestempel ausgestattet sein. Die Anlage wäre je nach Aufbau der Werkzeuge in der Lage, ein gewisses Spektrum an Biegewinkeln zu realisieren.

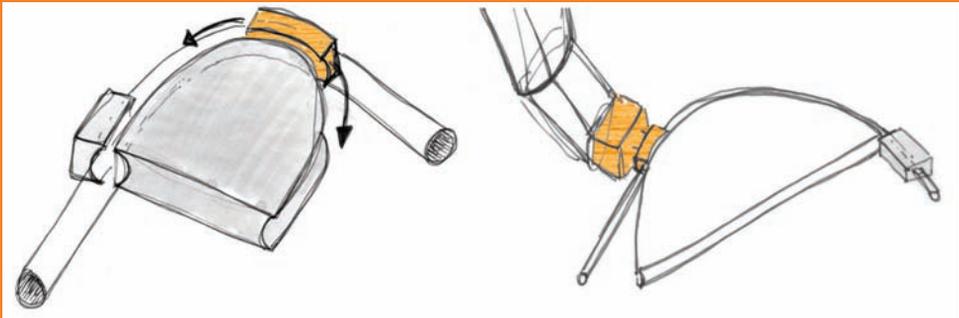
Theoretisch wäre es sogar möglich, zwischen zwei bereits gebogenen Rohrabschnitten einen weiteren Knick zu setzen. Dies wäre, verglichen mit anderen Biegeverfahren, schon ein großer Fortschritt, da diese normalerweise streng linear ablaufen, d.h. die einzelnen Biegungen müssen in ihrer festgelegten Reihenfolge auf dem Rohr gebogen werden.

Allerdings würde sich das Handling der Werkstücke bei diesem Verfahren äußerst schwierig gestalten. Je mehr Biegungen ein Rohr bereits hat, desto aufwändiger ist zu berechnen, wie es vom Roboter gegriffen und in die Biegevorrichtung gesetzt werden soll. Eine Kollisionsvorhersehung bei vielen Knicken in einem Rohr, noch dazu wenn diese nicht nur in der Ebene sind, sondern sich dreidimensional im Raum entwickeln, wäre äußerst schwierig. Hier immer wieder von neuem die beste Reihenfolge der Biegungen herauszufinden, wäre für jedes einzelne Werkstück mit großem Aufwand verbunden.

Dies würde einen untragbaren Aufwand bedeuten, da in diesem Versuch angestrebt wird, keine Serien von gebogenen Rohren zu fertigen, sondern stattdessen den Versuch so aufzubauen, dass Objekte gebogen werden können, die allesamt Einzelstücke darstellen.



Skizzierte Überlegungen zum Rotationszugbiegen (orange Teile werden vom Roboter geführt)



Skizzierte Überlegungen zum Kompressionsbiegen (orange Teile werden vom Roboter geführt)

ROTATIONSZUGBIEGEN

Aufgrund der weiten Verbreitung und der Präzision des Rotationszugbiegens wurde auch für dieses Verfahren geprüft, wie es auf die Roboterversuchsanlage zu übersetzen wäre. Die am Anbauflansch installierten Werkzeuge könnten wie in der Pressbiegevariante als Greifer dienen sowie zusätzlich die Biegerolle und ein Klemmstück tragen. Das Rohr könnte vor der Biegung an der Rolle festgeklemmt und dann durch eine Drehung der Roboterhand um sie herum gebogen werden.

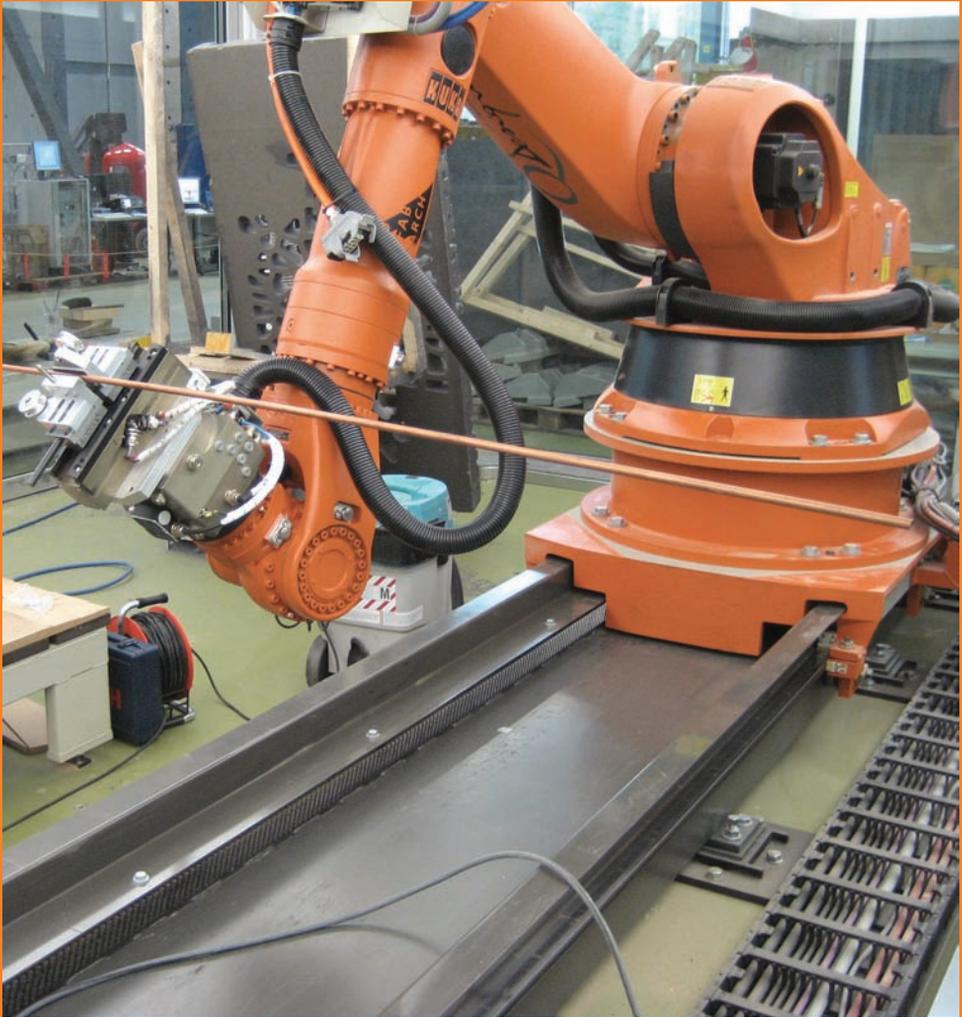
Vorteilhaft wäre, dass die Peripherie, also die zusätzlichen Aufbauten um den Roboter herum, sehr minimiert werden könnte und der Roboter selbst die entscheidenden Arbeiten ausführt. Problematisch werden allerdings die auftretenden Kräfte, was zu zwei Schwachstellen führt: Zum einen müsste der Greifer in der Lage sein enorm zuzupacken, damit das Rohr beim Biegevorgang nicht durchgleitet - allerdings kommt nur eine pneumatische Bedienung des Greifers in Frage, da diese an der bestehenden Anlage bereits vorhanden ist (zur Verfügung stehen maximal 4 bar). Zum anderen führt das Biegen durch eine Drehung der Roboterhand zu großen Belastungen der Achse 6, was deren Kapazität schnell überschreiten würde.

KOMPRESSIONSBIEGEN

Eine vom Vorgang her recht schlüssige Methode der Umformung bietet das Kompressionsbiegen. Ein ähnliches Verfahren würde man wahrscheinlich auch wählen, sollte man ein Rohr händisch und nur mit Hilfe einfacher Werkzeuge krümmen. Das Werkstück wird in einer Art Klemme oder einem Schraubstock eingespannt und dann um eine Biegeform oder Rolle herumgeführt. Dies macht das Verfahren sehr simpel und dadurch leicht beherrschbar.

Vorteilhaft ist die Tatsache, dass ähnlich wie beim Pressbiegen, der Roboterarm als ganzes den Biegevorgang ausführt. So kommen keine Belastungsspitzen in der Roboterhand zustande wie etwa beim Rotationszugbiegen. Weitere Bewegungsabläufe wie der Vortrieb des Werkstücks oder dessen Rotation können ebenfalls vom Roboter ausgeführt werden, wenn dieser nicht nur eine Biegerolle oder einen Gleitschlitten für die Umformung des Rohres trägt, sondern zusätzlich noch mit einem Greifer bestückt ist.

Als nachteilig kann gesehen werden, dass auch bei diesem Verfahren ein streng lineares Abarbeiten der einzelnen Biegungen von Vorteil ist - das bedeutet, dass weitere Knicke nicht mehr zwischen zwei bereits bestehende gesetzt werden können.



5.2 Biegeverfahren für Roboter?

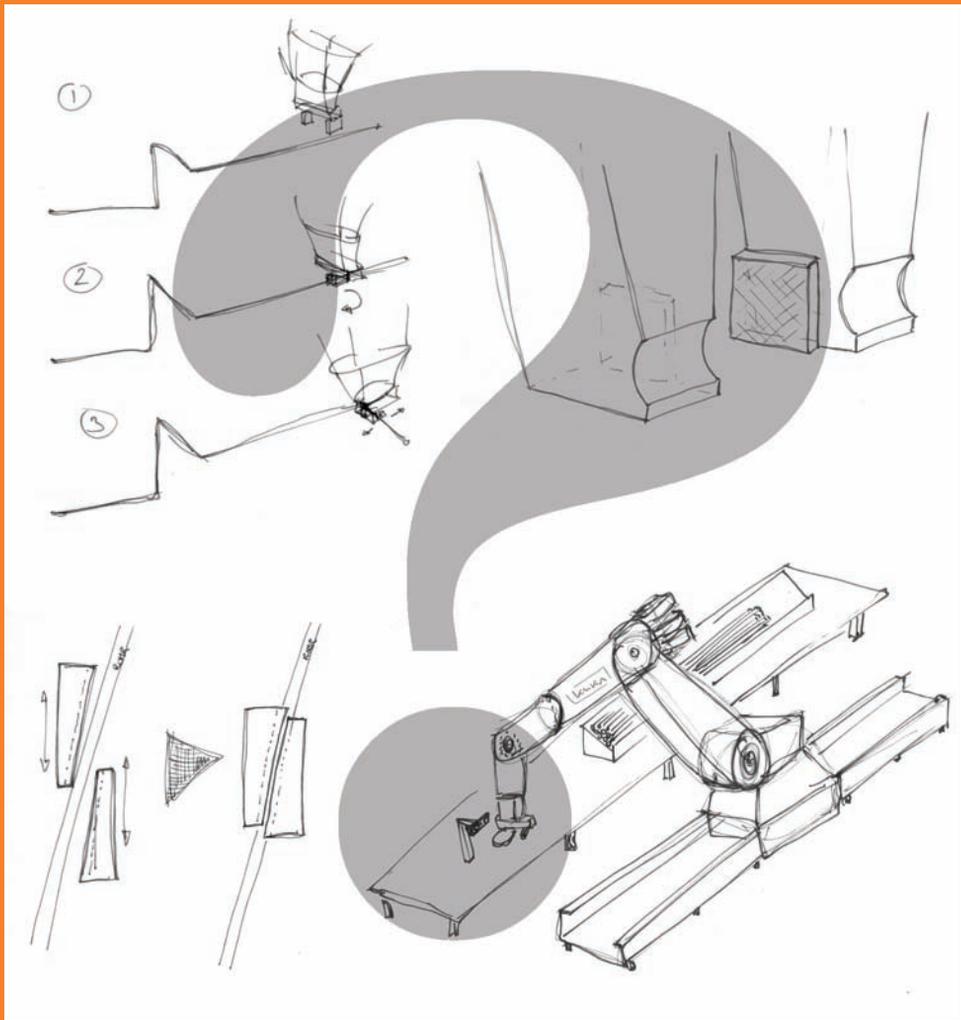
Die heute üblichen Biegeverfahren sind durch unterschiedliche Aspekte gekennzeichnet, die je nach Aufgabe oder gewünschtem Ergebnis von Vorteil sind, dadurch aber andererseits auch Einschränkungen mit sich bringen. Sie wurden z.T. über lange Zeiträume weiterentwickelt und sind auf die jeweiligen Anforderungen zugeschnitten. Das Biegen mit einem Roboter eröffnet aber ganz neue Möglichkeiten und provoziert einen völlig anderen Aufbau der Biegemaschine. Die große Flexibilität des Arbeitsgerätes bringt die Chance mit sich, den gesamten Vorgang zu reorganisieren. Deshalb geht bei einer 1:1-Übersetzung eines bestehenden Verfahrens auf die Roboterversuchsanlage viel an Innovation und Möglichkeiten verloren.

Doch wie muss ein Aufbau aussehen, der auf die neue Situation zugeschnitten ist? Was nun sicherlich wegfallen kann, ist der streng lineare Ablauf bei Umformaufgaben mit mehreren Rohrknicke. Da sich der Roboterarm frei bewegen kann, entfällt die Notwendigkeit eine Biegung nach der anderen zu setzen. Dies führt beispielsweise dazu, dass bereits umgeformte Teile, die schon Biegungen oder irgendeine Art von Endumformung aufweisen, weiter bearbeitet werden können. Das heißt weitere Knicke können sogar in der Werkstückmitte ausgeführt werden.

Dadurch wird der gesamte Biegeprozess variabler, was dazu führt, dass Teile, die vorher aufgrund von Kollision mit der Maschine oder mit sich selbst, unbiegsam waren oder eine Stückelung erforderten, nun eventuell durch Ausführen der Biegungen in einer neuen Reihenfolge produzierbar werden. Hier führt die Flexibilität des Roboterarms zu weiteren Vorteilen, da er in der Lage ist sich dem Knickpunkt auf verschiedene Arten zu nähern, so dass eine andere Stellung der Roboterhand eine nicht ausführbare Biegung doch biegsam macht.

Da der Roboter fast alle Arbeitsschritte selbst übernimmt, kann die Peripherie, also der Maschinenteil in dem das Werkstück gegebenenfalls eingespannt ist oder um den gebogen werden soll, stark minimiert werden. Dies führt wiederum zu weniger Kollisionen, was die Produzierbarkeit heikler Geometrien weiter verbessert.

Schlussendlich kann der Roboter sogar Aufgaben übernehmen die rund um den eigentlichen Biegevorgang anfallen. Er könnte eingesetzt werden für das Positionieren der Werkstücke, das nach dem Bearbeiten eventuell erforderliche Palettieren oder allgemein für das Handling. Dies führt zu enormen Einsparungen bei weiteren Maschinen oder zusätzlichem Personal.



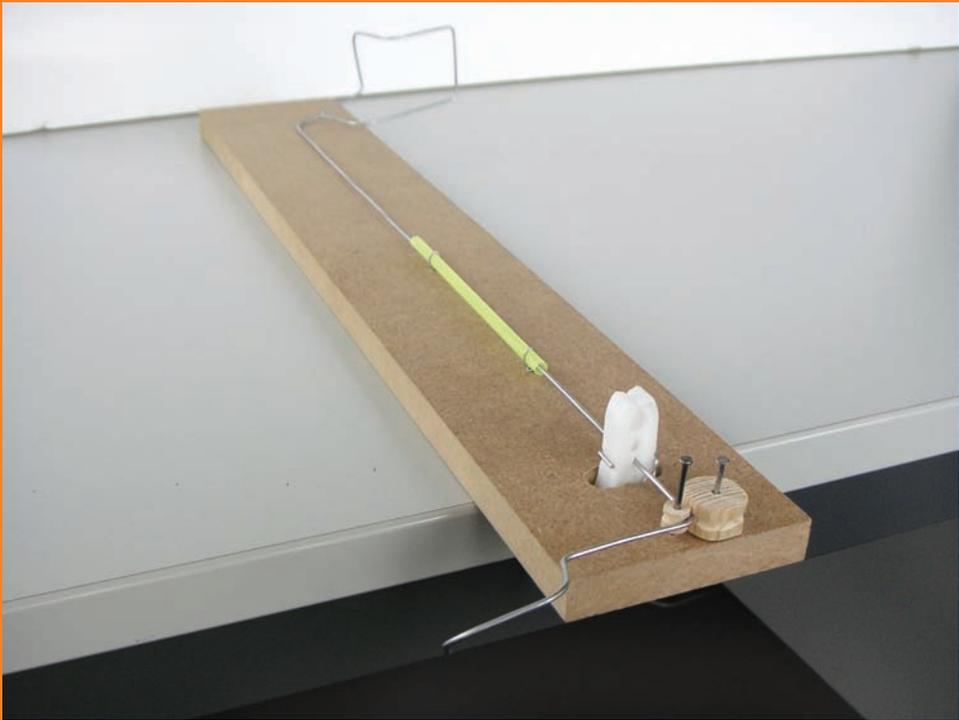
5.3 Konstruktion der optimalen Maschine

Logische Konsequenz aus der Flexibilität des Roboters wäre also ein Maschinendesign, das diese bestmöglich nutzt und unterstützt. Das bedeutet, dass alle relevanten Maschinenteile am Roboterarm selbst installiert sein müssten, so dass der eigentliche Biegevorgang dort passieren kann.

Am einfachsten könnte dies durch eine Art Greifer geschehen, der an das Rohr gefahren wird und durch «Zupacken» die Biegung erzeugt. So könnte das Rohr an beliebigen Stellen verformt werden, sogar zwischen bestehenden Biegungen bestünde die Möglichkeit weitere zu setzen. Die gesamte Peripherie bestünde nur aus einer Halterung, die das Werkstück hält solange der Greifer umgesetzt wird. Dadurch könnte die volle Flexibilität ausgeschöpft werden und auch die Maschine an sich wäre bis auf ein Minimum reduziert.

Doch dies führt leider zu einigen Problemen bzw. wird durch bestimmte Gegebenheiten eingeschränkt, die die Konstruktion der Maschine in eine andere Richtung zwingen. Größtes Problem ist wohl die Geometrie des gebogenen Rohres selbst. Denn bei einem derart freizügigen Ablauf der Umformprozesse, ist es unumgänglich, dass der Roboter bzw. das ihn steuernde Programm zu jeder Zeit weiß, wie die Geometrie des Werkstücks gerade ist. Das ist zwar eine an sich lösbare Aufgabe, führt aber vor allem bei einer variablen Reihenfolge der Biegungen zu sehr komplexen Berechnungen. Doch nur dadurch können einerseits Kollisionen vermieden und andererseits der Vorgang selbst beherrschbar gemacht werden. Denn ohne diese Berechnungen kann der Roboter nicht wissen, wo er das Werkstück greifen muss um die nächste Biegung überhaupt ausführen zu können. Verstärkt wird die Problematik durch Toleranzen, die sich zwangsläufig ergeben. Hat der Roboter erst mal auch nur geringfügig falsch gegriffen, potenzieren sich die Fehler bei den folgenden Biegungen. Dies bringt Probleme mit sich, die sowohl das Programmieren der Steuerung als auch die Produktion selbst betreffen und diese extrem komplex werden lassen.

Eine weitere Schwierigkeit stellt die Konstruktion des Biegreifers selbst dar. Denn der bestehende Roboter Aufbau bringt zwar eine Pneumatik mit, doch ist diese für eine derartige Steuerung nicht geeignet. Zur Verfügung steht nur ein Druck von 4 bar, was für die geplanten Umformungen zu wenig ist. Durch einen zusätzlichen Kompressor könnte mehr Druck erzeugt werden, doch dieser müsste sehr viel höher sein um auszureichen. Zudem wäre ein solches System äußerst schwer zu steuern, da der Luftdruck, anders als bei Systemen, die mit Flüssigkeiten (Wasser, Öl) arbeiten, nicht unmittelbar wirkt, sondern eine gewisse Zeit zum Kräfteaufbau braucht. Das größte Problem ergibt sich aber aus dem Umstand, dass ein pneumatischer Greifer nur die Zustände «auf» und «zu» kennen würde. Durch das Fehlen einer stufenlosen Regulierung könnten also nur Biegungen mit einem einzigen vordefinierten Winkel produziert werden.



Funktionsmodell des geplanten Aufbaus

Das Rohr wird in eine Führung eingelegt. Die Klammer repräsentiert eine Art Klemme, die das Rohr fixiert. Vorne sind Rollen angebracht, um die das Rohr gebogen wird. Der Roboter trägt einen Greifer, mit dem er das Rohr packen und manövrieren kann, sowie eine Biegerolle oder Gleitschiene, mit der er das Werkstück um die Rollen der Peripherie drückt.

5.4 Realisierbarkeit

Die im vorherigen Kapitel dargestellten Probleme zwangen dazu, den Versuchsaufbau weit konservativer auszuführen als anfangs geplant. Doch um den zeitlichen und finanziellen Rahmen nicht zu sprengen, musste die Konstruktion umgeplant werden. Im Detail bedeutete dies:

VEREINFACHUNG DER KOORDINATION UND UMGEHEN DES KRÄFTEPROBLEMS

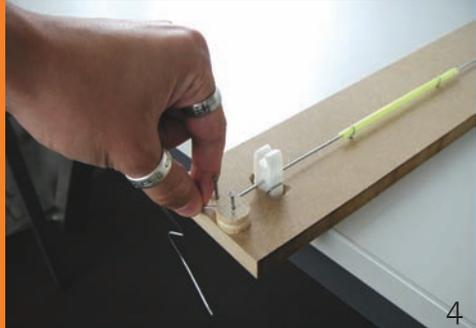
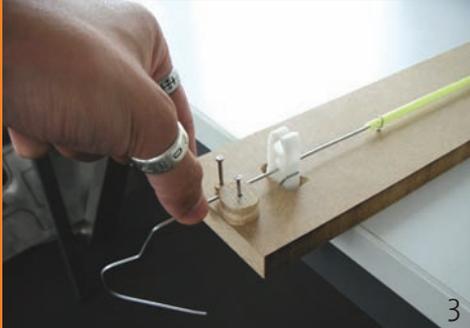
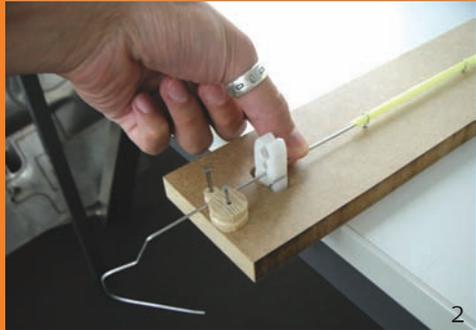
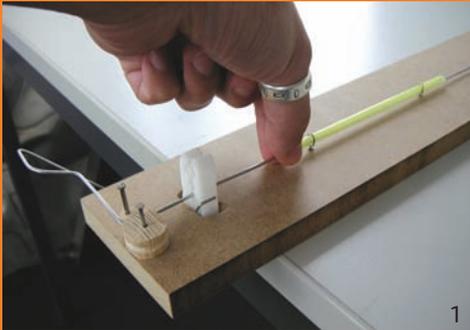
Die Idee einer variablen Reihenfolge der Biegungen wurde wieder zugunsten einer linearen Abfolge aufgegeben. Dadurch kann das zu biegende Rohr in einer simplen Halterung eingespannt und schrittweise herausgezogen werden. Dies nimmt viel der proklamierten Flexibilität, lässt aber die komplexen Berechnungen wegfallen, die andererseits nötig geworden wären und in der Kürze der Zeit nur hätten angedacht werden können.

Da ein pneumatischer Greifer nicht in der Lage gewesen wäre, die für die Umformung nötige Kraft aufzubringen, muss für den Biegevorgang also der Roboterarm selbst herangezogen werden. Da dessen Antriebe ohnehin vorhanden sind, ist es nur logisch konsequent, sie auch für die Umformung einzusetzen. So können weitere Anschaffungen, die zusätzliche Planung, Kosten und Platzbedarf bedeutet hätten, vermieden werden.

Trotzdem limitiert die vorhandene Kraft die Möglichkeiten der Maschine. Dies ist zwar je nach Fabrikat und Typ des Roboters verschieden, führte aber in diesem Fall zu der Entscheidung, maximal Rohre mit einem Durchmesser von 12mm zu biegen.

GEWÄHLTER VERSUCHSAUFBAU

Nach weiteren Überlegungen und Planungsdurchläufen fiel die Wahl auf eine Versuchsanordnung, die mit den gegebenen Mitteln realisiert werden konnte und die im Wesentlichen dem Prinzip des Kompressionsbiegens sehr nahe kommt. Mit der geplanten Struktur kann die Idee der Digitalen Kette exemplarisch durchexerziert werden und sie ist simpel genug um in der Kürze der Zeit gebaut und programmiert werden zu können. Doch gerade seine Einfachheit macht den Aufbau technisch interessant und beweist gleichzeitig seine Wirtschaftlichkeit.



Das Biegen geschieht in einem sich wiederholenden Prozess, der aus zwei Bewegungsabläufen (Vortrieb + Verformung) besteht, die wiederum grob in insgesamt fünf Unterschritte unterteilt werden können.

- 1: Greifen des Rohrs
- 2: Vorschieben des Rohrs um Länge L + Drehung um Rotation R
- 3: Bewegung zum Biegepunkt
- 4: Das eigentliche Biegen, Winkel A
- 5: Fahrt zur Ausgangsposition; Beginn des Prozesses von Neuem

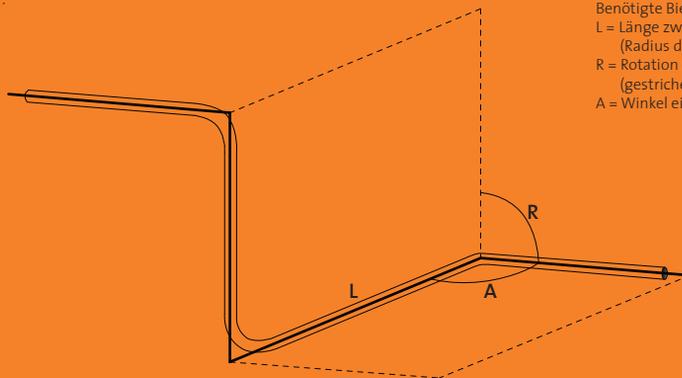
5.5 Detailierung der Idee

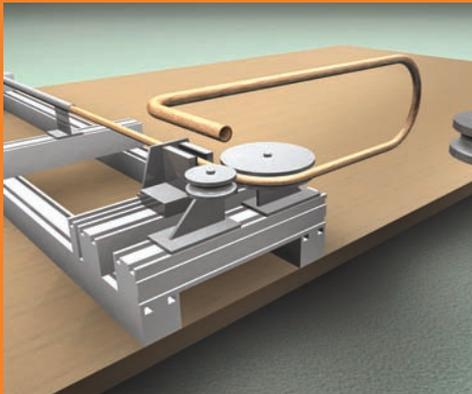
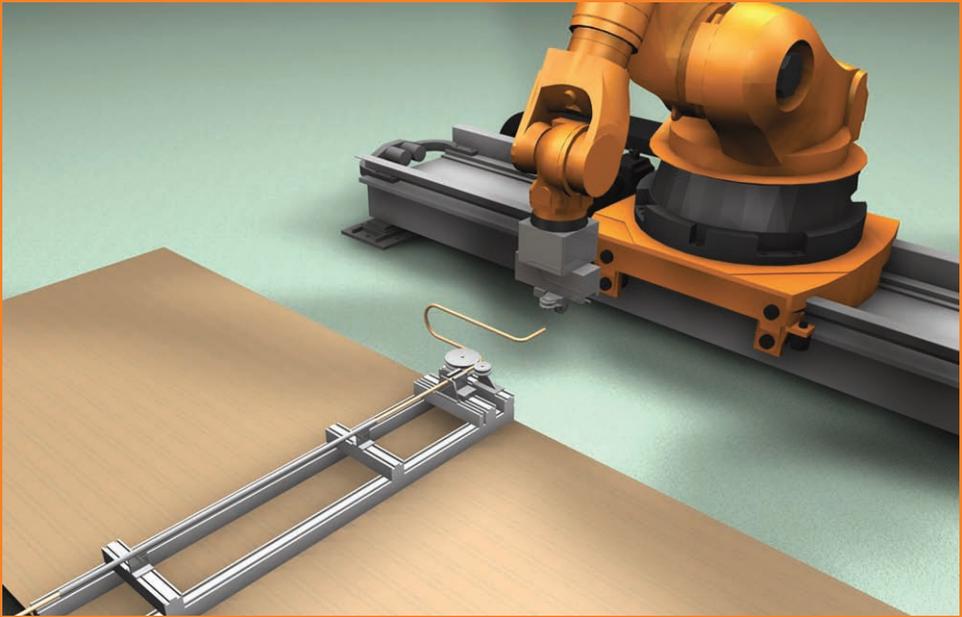
Im weiteren Verlauf musste die bis dahin erst skizzenhaft vorhandene Planung detailliert werden. Dazu waren zuallererst Überlegungen notwendig, wie genau der Biegeprozess abläuft. Im Wesentlichen besteht er aus zwei sich wiederholenden Bewegungsmustern: Der Positionierung des Rohres für die nächste Biegung und dann die tatsächliche Umformung.

Die Positionierung setzt sich aus dem Vortrieb und der Rotation des Rohrs zusammen. Die Länge des Vortriebs ist die Strecke zwischen zwei Biegungen und wird üblicherweise mit L bezeichnet. Die Rotation R definiert das Verdrehen des Werkstücks von der vorherigen Biegeebene zur folgenden. Eine solche Biegeebene wird von den jeweils zwei geraden Rohrstücken vor und nach der Biegung definiert.

Für den Roboter heißt das: Er schiebt das Rohr in der Biegevorrichtung nach vorne und dreht es dabei um seine Längsachse. Die Werte L und R sind natürlich bei jeder Biegung anders und müssen entsprechend angepasst werden.

Der zweite Bewegungsablauf ist der Biegevorgang selbst. Er wird beschrieben durch den zu biegenden Winkel, im allgemeinen mit A betitelt (engl. «angle»). Der Roboterarm bewegt sich dazu an die Vorderseite der Peripherie, setzt am Rohr an und drückt es um die Biegerolle, welche dadurch den Radius der Biegung definiert.





5.6 Ausarbeitung

ERSTE KONKRETISIERUNG

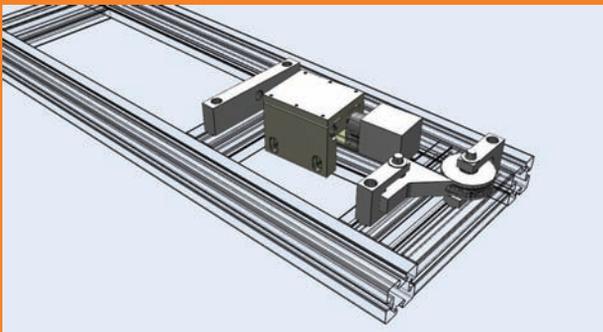
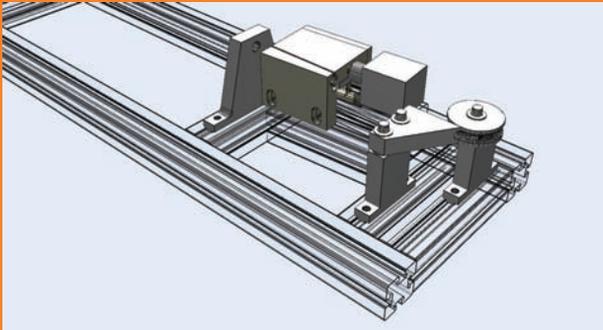
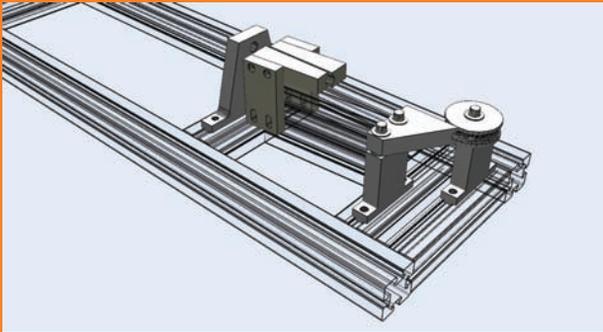
Der nächste Schritt bestand daraus, die Idee aus dem Funktionsmodell (Seite 32) zu konkretisieren und in Zeichnungen zu übersetzen. Dazu musste erst der Bestand aufgenommen werden, um die Schnittstellen zum vorhandenen Roboter und der gesamten Anlage berücksichtigen zu können.

Der Roboterarm kann mit verschiedenen Köpfen bestückt werden, die wiederum für die Aufnahme unterschiedlicher Werkzeuge gemacht sind. Glücklicherweise gab es bereits einen Greifer in dieser Auswahl, der in seiner Grundfunktion zu den geplanten Aufgaben herangezogen werden konnte und nur etwas modifiziert werden musste. Desweiteren war der Arbeitstisch, sowie die bereits erwähnten pneumatischen Anschlüsse vorhanden.

Mit diesen Vorgaben als Grundlage konnte der Aufbau von «projekt **bender**» erstmals detaillierter angedacht werden. Dieser kann grob in 3 Teile gegliedert werden:

- Greifer und Biegewerkzeug am Roboterkopf
- Werkzeuge auf dem Arbeitstisch (Klemme, Anschlag und Biegerollen)
- Unterkonstruktion bestehend aus einem Schienensystem

Der große Vorteil dieses Aufbaus besteht darin, dass er insgesamt äußerst simpel gehalten ist. So sollte es auch in dem engen zeitlichen und finanziellen Rahmen möglich sein, die Biegemaschine zu bauen. Allerdings war die Konstruktion insgesamt noch nicht ausgereift und es waren einige Probleme zu erwarten. Die Klemme, die das Rohr während des Biegens fixiert, würde wahrscheinlich nicht genügend Kraft aufbringen können, so dass sie vom Rohr aufgedrückt werden könnte. Außerdem war nicht sicher, ob die Biegerollen den großen Kräften widerstehen würden. Zudem gab es an dieser Stelle noch ein geometrisches Problem: Vorgesehen waren erst zwei unterschiedlich große Rollen, um verschiedene Radien biegen zu können. Doch in der geplanten Anordnung standen sie sich gegenseitig im Weg, so dass das Biegewerkzeug des Roboters nicht nahe genug herankommen konnte. Denn je größer der Abstand zwischen Biegerolle und Biegewerkzeug ist, desto mehr Spiel hat das Rohr und wird dadurch ungenau gebogen.



Verschiedene weitere Entwicklungsstufen der Peripherie. Vor allem die Klemme erforderte viel Entwicklungsarbeit. Insgesamt wurde versucht, den Aufbau möglichst kompakt und einfach zu gestalten.

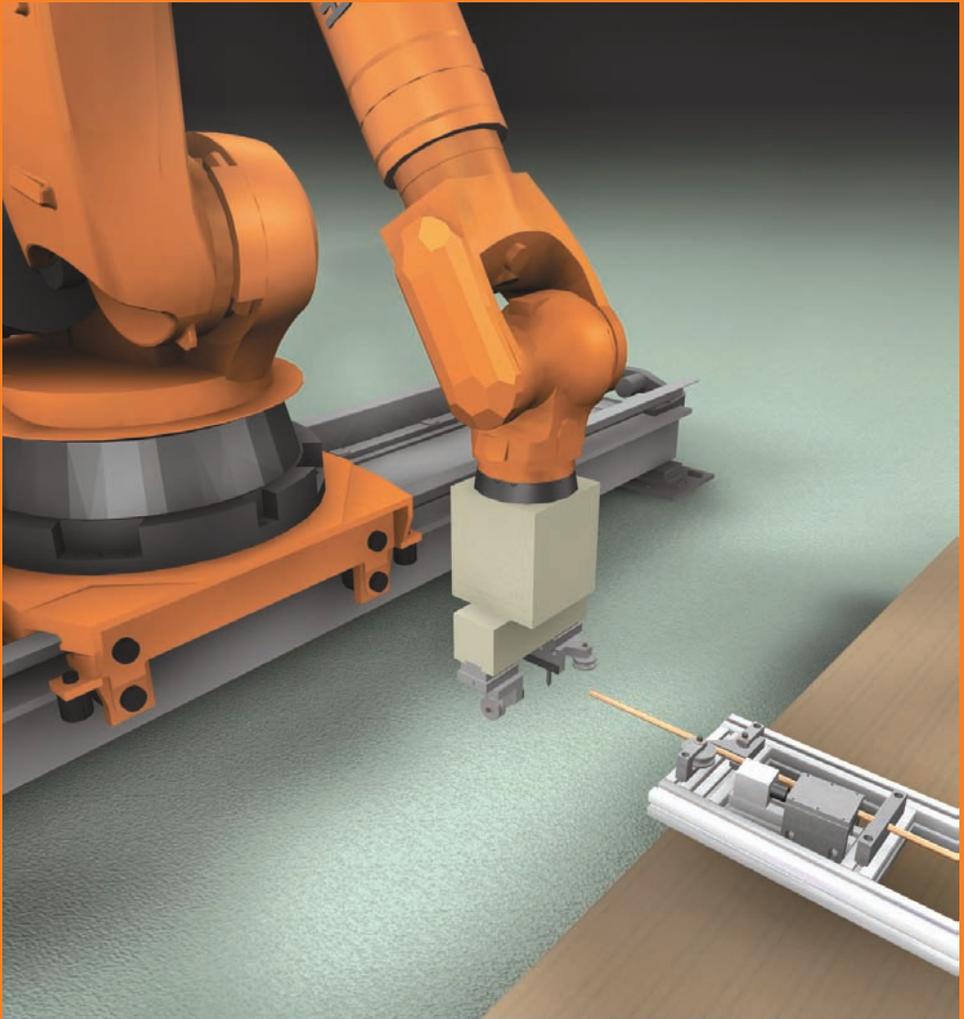
WEITERE ENTWICKLUNGSSTUFEN

Im weiteren Verlauf der Arbeit entstanden zahlreiche Varianten und Entwicklungsstufen des Versuchsaufbaus. Komplexester und gleichzeitig auch planungsintensivster Teil des Systems war der Klemmgreifer. Das Problem, dass er während des Biegevorgangs aufgedrückt werden könnte, wurde dadurch behoben, dass er sich nicht mehr in Richtung der wirkenden Querkräfte öffnen ließ, sondern um 85° gedreht wurde. Der agierende Teil wurde auf eine Art Schieber minimiert. Dieser ist keilförmig und mit etwa 5° schräg zur Längsachse des Rohrs montiert. Beim Hineinfahren in ein Gehäuse klemmt er das Rohr so fest, dass es sich nicht mehr bewegen kann. Angetrieben wird der Keil von einem pneumatischen Kurzhubzylinder, der direkt an die Robotersteuerung angeschlossen ist.

Das Platzproblem an den Biegerollen wurde dadurch gelöst, dass eine der beiden Rollen durch ein spitz zulaufendes Gegenlager ersetzt wurde. Dieses ermöglicht nicht nur mehr Bewegungsfreiheit, sondern dient gleichzeitig auch der Aufnahme von Querkräften, die beim Biegevorgang entstehen.

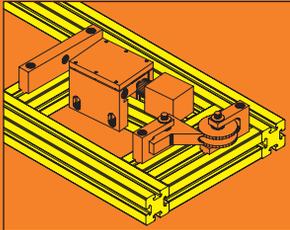
Insgesamt wurde versucht, den Aufbau so kompakt wie möglich zu gestalten. Denn das bringt nicht nur mehr Flexibilität beim Biegen, da Kollisionen mit dem Werkstück vermieden werden, sondern führt auch zu kürzeren Reststücken am Ende des Rohrs. Dieses muss auch bei der letzten Biegung noch von der Klemme gehalten werden. Dadurch ergibt sich ein Endstück, das eventuell nicht benötigt wird und abgesägt werden muss.

Ein weiterer Aspekt, der großen Einfluss auf das Design der Werkzeuge hatte, war deren Herstellung. In enger Absprache mit Werkstattchef Herrn Jenni (Mechanische Werkstatt des D-BAUG, ETH) wurden die Bauteile so gestaltet, dass sie in möglichst wenig Einzelschritten gefertigt werden konnten. So wurde ebenfalls versucht, die Anzahl der Einzelteile zu minimieren, was schlussendlich auch der Montage des Systems zugute kam.



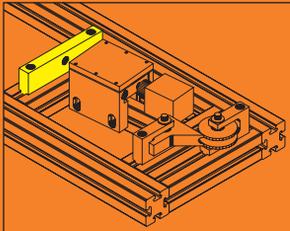
5.7 Realisierter Aufbau

Schließlich wurde der Entwicklungsprozess der einzelnen Werkzeuge abgeschlossen und somit nicht nur ihr Design, sondern auch ihre Funktion und damit der ganze Versuchsaufbau festgelegt. Im Folgenden werden die einzelnen Tools und ihre Aufgabe vorgestellt:



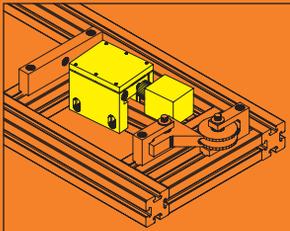
SCHIENENSYSTEM

Als Grundlage für die Peripherie dient ein BLOCAN®-Profilsystem der Firma RK ROSE+KRIEGER GmbH. Das modulare Schienensystem aus Aluminium kann nach Belieben zusammengestellt werden. Es ist relativ einfach zu montieren und stabil genug um die Kräfte beim Biegen aufnehmen zu können. Alle weiteren Werkzeuge wurden so gestaltet, dass sie auf das Profilsystem montiert werden können.



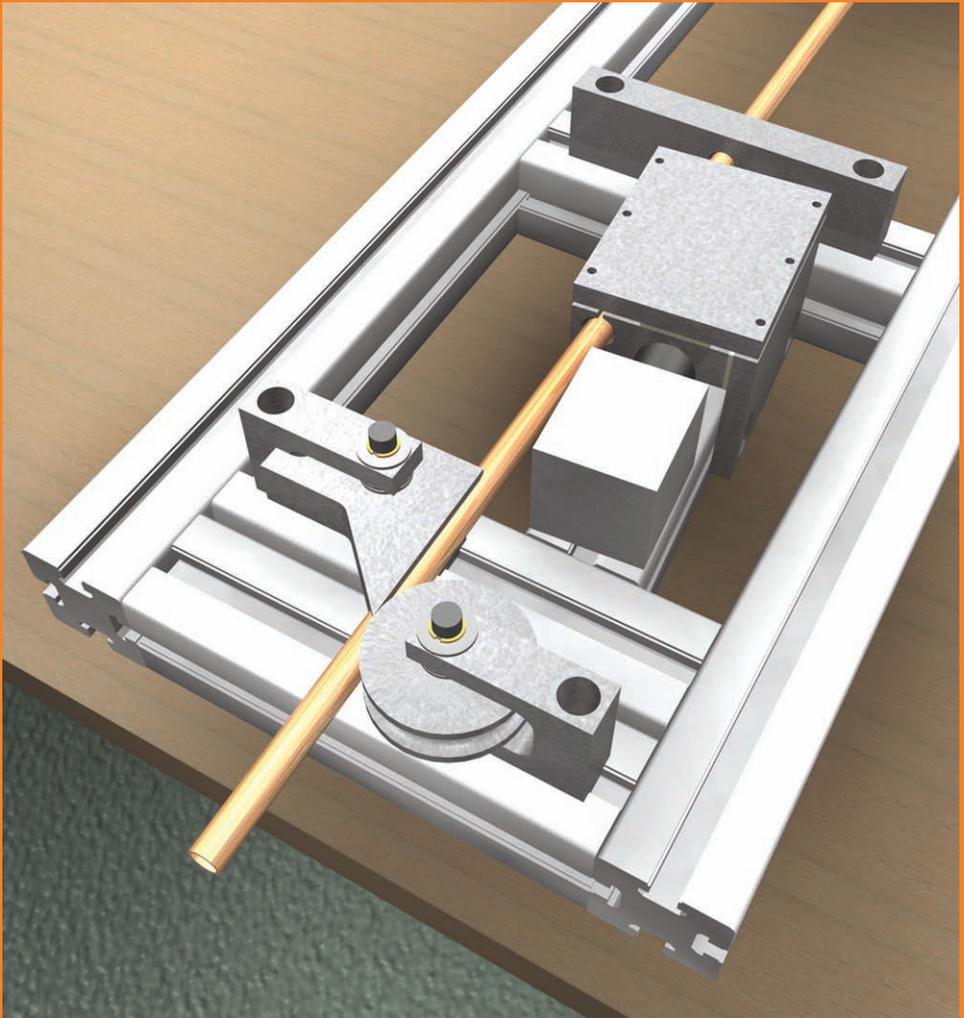
ANSCHLAG

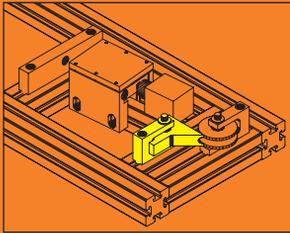
Der Anschlag dient sowohl der Justierung des Rohrs beim Einlegen als auch seiner Stabilisation beim Biegen. Hinter ihm befindet sich das freie Stück an dem der Roboter zupackt um das Rohr in die nächste Biegeposition zu fahren. Er sorgt dafür, dass das Rohr an dieser Stelle eine definierte Position hat und kann einen Teil der während des Biegevorgangs entstehenden Querkräfte aufnehmen.



KLEMMGREIFER

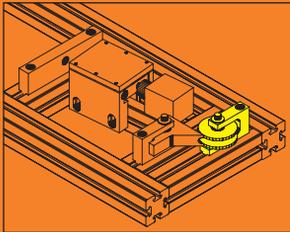
Der Klemmgreifer ist neben der Biegerolle das wichtigste Element der Peripherie. Er hält das Rohr, während der Roboter beim Positionieren für die nächste Verformung umgreift und sorgt dafür, dass es beim Biegen nicht nachrutscht - wäre das Rohr während dieses Vorgangs nicht fixiert, würde es einfach abknicken anstatt sich um die Biegerolle formen zu lassen. Bedient wird der Klemmkeil von einem pneumatischen Kurzhubzylinder (hier der Quader rechts - Beschreibung S.45).





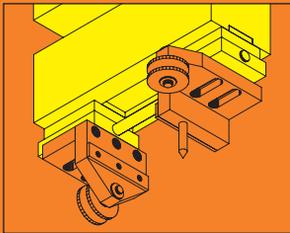
GLEITSCHIENE

Die Gleitschiene ist eine Art Führung, die das zu biegende Rohr in Position hält und es gegen die Biegerolle drückt. Gleichzeitig dient es als Gegenlager, das die Querkkräfte beim Biegen aufnimmt, weshalb es stabil gebaut sein muss. Es ist so gestaltet, dass es dem Biegeprozess möglichst viel Platz einräumt und dass es ggf. auch eine zweite Biegerolle aufnehmen kann. So wäre sogar ein Links-Rechts-Biegen möglich.



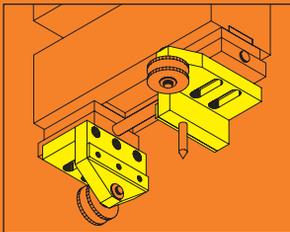
BIEGEROLLE PERIPHERIE

Der wichtigste Teil der Peripherie ist die Biegerolle. Um sie wird das Werkstück gebogen. Aus diesem Grund muss sie stabil gebaut sein. Auch ihre Halterung muss in der Lage sein, die auftretenden Kräfte gut in die Unterkonstruktion zu übertragen. Es ist möglich, Rollen verschiedener Größe in die Halterung zu setzen, so dass unterschiedliche Biegeradien realisiert werden können.



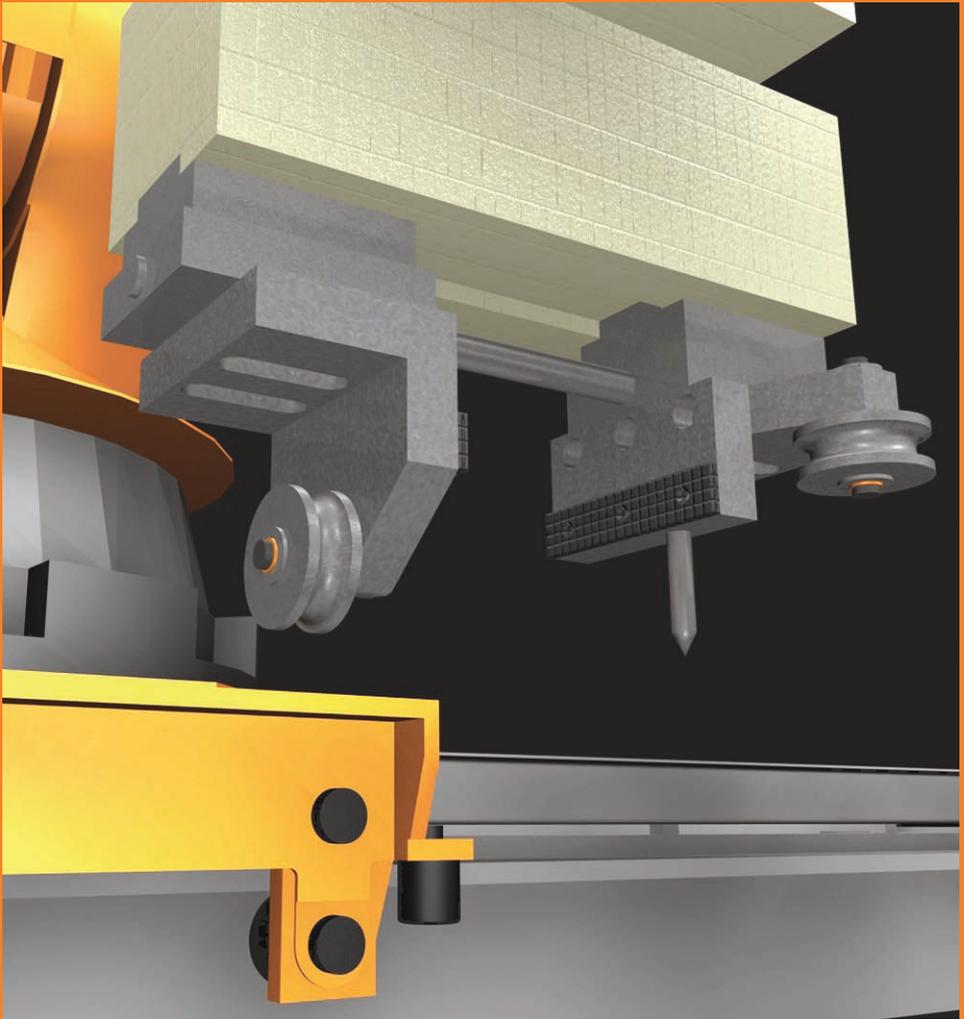
ROBOTERKOPF BESTAND

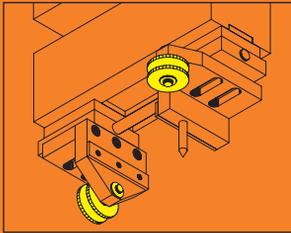
Dieser Teil des Versuchsaufbaus gehört zum Bestand des Roboters und musste nicht extra angefertigt werden. Er kann an den Anbauflansch des Roboters montiert werden und stellt die Basis für einen pneumatischen Greifer. Lediglich der Greifer selbst musste den Anforderungen angepasst und neu gestaltet werden. Die neuen Teile wurden dann einfach an den Bestand angepasst und montiert.



GREIFER

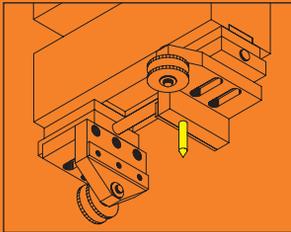
Der neue Greifer des Roboters ist in der Lage das Rohr zu packen und zu positionieren. Dazu wird er mit Hilfe eines pneumatischen Antriebs direkt vom Roboter gesteuert. Er kommt also zum Einsatz, wenn das Werkstück zwischen zwei Biegungen vorgeschoben und rotiert werden muss. Um ein Abrutschen zu vermeiden, sind seine Griffflächen mit EVA-Schaum belegt. Außerdem trägt er zwei Biegerollen sowie die Referenzspitze.





BIEGEROLLEN ROBOTER

Die beiden am Roboterkopf befestigten Rollen sind dazu da, das Rohr um die an der Peripherie befestigte Rolle zu biegen. Sie sind in unterschiedlichen Stellungen am Greifer befestigt, so dass der Roboterarm das Rohr aus verschiedenen Positionen heraus umformen kann. Dadurch können etwaige Kollisionen mit dem Werkstück umgangen werden.



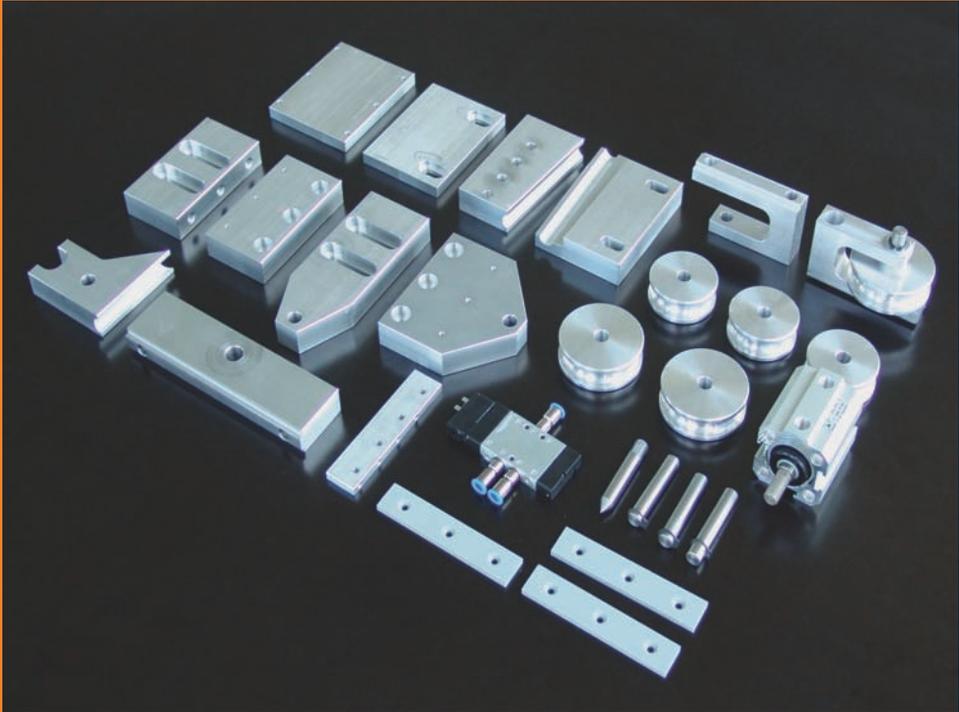
REFERENZSPITZE

Die Referenzspitze ist an einem exponierten Punkt der Greifers befestigt. Sie dient während der Versuchseinrichtung zum Ausmessen. Erst wird der am Roboter montierte Greifer vermessen, indem ein beliebiger Punkt im Raum aus vier verschiedenen Armstellungen heraus angefahren wird. Anschließend kann damit die Peripherie aufgenommen werden. Sind diese Daten gespeichert, kann die Referenzspitze abgenommen werden um beim Biegen nicht im Weg zu stehen.



KURZHUBZYLINDER + STEUERUNG

Zur Bedienung des Klemmgreifers wird ein Kurzhubzylinder eingesetzt. Er arbeitet mit Luftdruck und wird über eine kleine Schaltungseinheit vom Robotersystem gesteuert. Somit kann der Klemmgreifer direkt über einfache Befehle in den erstellten Programmskripts geöffnet oder geschlossen werden. Da nur eine geringe Hubhöhe benötigt wurde, konnte ein sehr kleiner Zylinder gewählt werden, was den Platzbedarf minimiert.



Die einzelnen Werkzeuge vor ihrer Montage.

Ganz oben die Teile des Klemmgreifers, rechts die Biegerollen samt Halterung sowie der pneumatische Kurzhubzylinder, in der Mitte links die Bauteile für den Robotergrifer, unten links die Gleitschiene und der Anschlag; unten rechts die pneumatische Steuerungseinheit sowie Kleinteile wie Achsen, die Referenzspitze und Griffpads aus PVC.

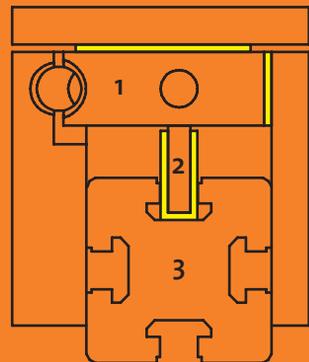
6.VORBEREITUNG UND AUFBAU DER ANLAGE

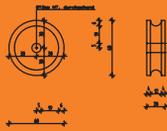
6.1 Produktion der Werkzeuge

Nach Abschluss der Planung konnten die Werkzeuge zur Produktion freigegeben werden. In Rücksprache mit Werkstattchef Herrn Jenni wurde beschlossen sämtliche Teile in Aluminium zu produzieren. Dadurch weisen sie zwar eine geringere Festigkeit als Stahlteile auf, waren aber einfacher und schneller zu produzieren. Da der Versuch nur einen beschränkten Zeitraum umfassen sollte, war davon auszugehen, dass die Teile der Belastung standhalten würden.

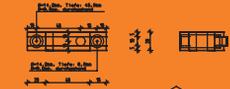
Die Griffflächen des Robotergreifers bilden eine Ausnahme - sie wurden aus PVC gefertigt und sollten später noch mit EVA-Schaum bezogen werden. Dadurch wird zum einen eine gewisse Rutschfestigkeit erreicht, die wichtig für die Maßhaltigkeit beim Biegen ist, zum anderen wird damit vermieden, dass der Greifer beim Zupacken die Oberfläche des Rohrs zerkratzt.

Außerdem wurde der Keil (1) des Klemmgreifers mit einer 2mm-Schicht Teflon belegt. Seine Schiene (2) wurde damit optimal in die Unterkonstruktion aus handelsüblichen Aluminiumprofilen der Firma ROSE+KRIEGER (3) eingepasst, so dass sie ohne Spiel darin bewegt werden konnte und sich dennoch leichtgängig vor- und zurückfahren ließ. Dies ist wichtig, da der vom Kurzhubzylinder bewegte Keil das zu biegende Rohr festklemmt und deshalb möglichs wenig Kraft des Hubzylinders durch Reibung verloren gehen sollte.

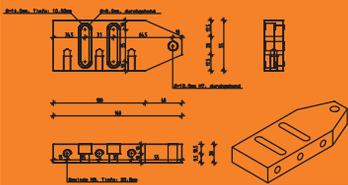




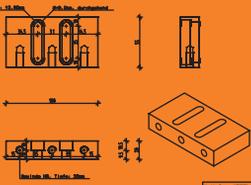
Größe: 10 mm
 Länge: 40 mm
 Innendurchmesser: 6 mm
 Material: St 50
 Zeichnung: Ringbolzen
 Anzahl: 2
 Maßstab: 1:1



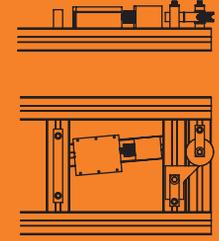
Größe: 10 mm
 Länge: 40 mm
 Innendurchmesser: 6 mm
 Material: St 50
 Zeichnung: Mutter Ringbolzen
 Anzahl: 2
 Maßstab: 1:1



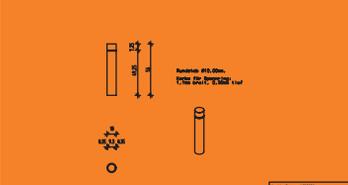
Größe: 10 mm
 Länge: 40 mm
 Innendurchmesser: 6 mm
 Material: St 50
 Zeichnung: Drahtanker
 Anzahl: 1
 Maßstab: 1:1



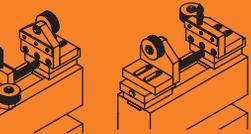
Größe: 10 mm
 Länge: 40 mm
 Innendurchmesser: 6 mm
 Material: St 50
 Zeichnung: Drahtanker
 Anzahl: 1
 Maßstab: 1:1



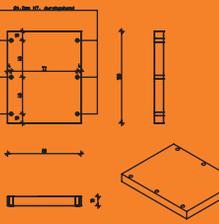
Größe: 10 mm
 Länge: 40 mm
 Innendurchmesser: 6 mm
 Material: St 50
 Zeichnung: Mutter Ringbolzen
 Anzahl: 1
 Maßstab: 1:1



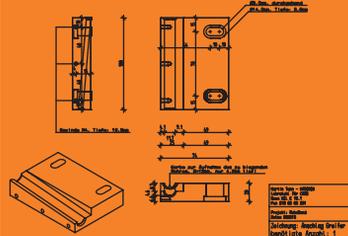
Größe: 10 mm
 Länge: 40 mm
 Innendurchmesser: 6 mm
 Material: St 50
 Zeichnung: Mutter Ringbolzen
 Anzahl: 2
 Maßstab: 1:1



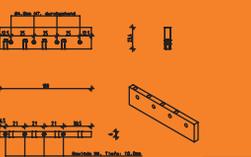
Größe: 10 mm
 Länge: 40 mm
 Innendurchmesser: 6 mm
 Material: St 50
 Zeichnung: Mutter Ringbolzen
 Anzahl: 1
 Maßstab: 1:1



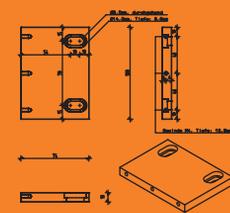
Größe: 10 mm
 Länge: 40 mm
 Innendurchmesser: 6 mm
 Material: St 50
 Zeichnung: Mutter Ringbolzen
 Anzahl: 1
 Maßstab: 1:1



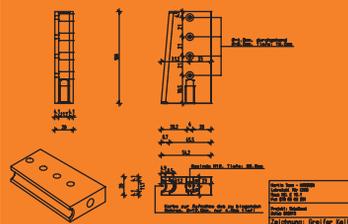
Größe: 10 mm
 Länge: 40 mm
 Innendurchmesser: 6 mm
 Material: St 50
 Zeichnung: Mutter Ringbolzen
 Anzahl: 1
 Maßstab: 1:1



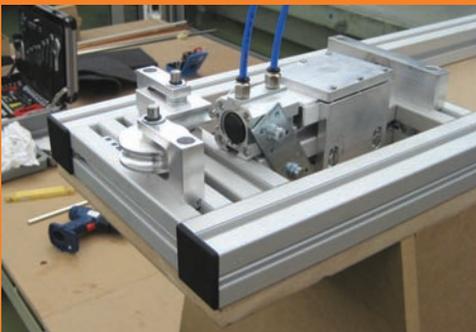
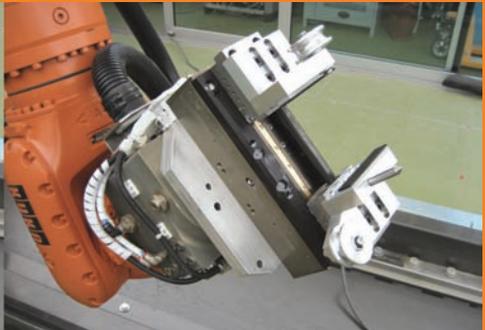
Größe: 10 mm
 Länge: 40 mm
 Innendurchmesser: 6 mm
 Material: St 50
 Zeichnung: Mutter Ringbolzen
 Anzahl: 1
 Maßstab: 1:1



Größe: 10 mm
 Länge: 40 mm
 Innendurchmesser: 6 mm
 Material: St 50
 Zeichnung: Mutter Ringbolzen
 Anzahl: 1
 Maßstab: 1:1



Größe: 10 mm
 Länge: 40 mm
 Innendurchmesser: 6 mm
 Material: St 50
 Zeichnung: Mutter Ringbolzen
 Anzahl: 1
 Maßstab: 1:1

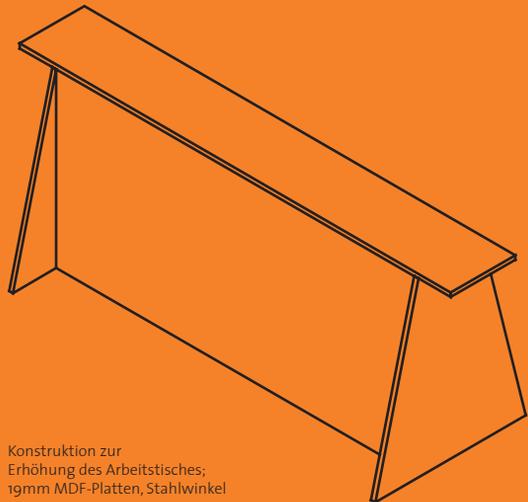


6.2 Aufbau und Einrichten der Peripherie

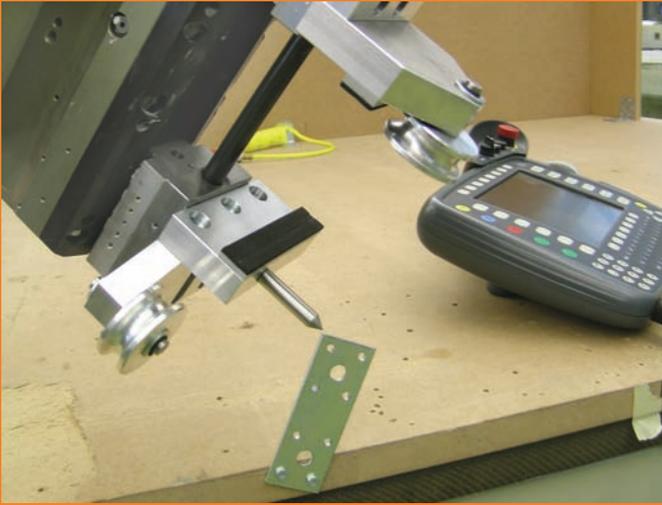
Die gesamte Peripherie wurde durch eine Unterkonstruktion um etwa 80 cm angehoben. Dadurch wurde nicht nur eine angenehme Arbeitshöhe erreicht, hauptsächlich diente der zusätzliche Aufbau dazu, dem zu biegenden Werkstück mehr Bodenfreiheit zu verschaffen. Auf dem niedrigen bestehenden Arbeitstisch wären die Rohre zu schnell am Hallenboden angeschlagen. Der Aufbau wurde aus handelsüblichen MDF-Platten erstellt und mit dem Arbeitstisch verschraubt um eine möglichst steife Konstruktion zu garantieren.

Darauf konnte dann der eigentliche Versuchsaufbau montiert werden. Zunächst wurde das flexible Schienensystem zusammen gebaut, um darauf die einzelnen Werkzeugteile befestigen zu können. Abschließend wurden diese ausgemessen und justiert. Der gesamte Aufbau gelang ohne nennenswerte Probleme und war binnen weniger Stunden abgeschlossen.

Um die Anlage zu komplettieren musste nur noch der Greifer des Roboterarms montiert werden. Die Bilder auf S.50 Mitte zeigen einmal links den Bestand des Roboters sowie auf der rechten Seite der fertig zusammengesetzte Greifer.



Konstruktion zur
Erhöhung des Arbeitstisches;
19mm MDF-Platten, Stahlwinkel



Ausmessen des Greifers
mittels 4-Punkt-Methode



Ausmessen der Peripherie zur
Aufnahme als Basiskoordinatensystem

6.3 Eingabe von Greifer und Basis

Nach Abschluss der Aufbauarbeiten mussten die Werkzeuge eingemessen werden, wobei erstmals der Roboter zum Einsatz kam. Dieser Vorgang dient zur Aufnahme der Umgebung in das Rechensystem des Roboters, der ohne diese notwendigen Schritte nicht exakt bedient werden kann.

Zunächst muss das Werkzeug am Anbauflansch des KUKA aufgenommen werden. Ohne diese Maßnahme kann das Rechensystem des Roboters nicht wissen, welche Abmessungen und Richtungen das an ihn montierte Werkzeug besitzt. Da anfangs noch keine Referenzwerte existieren kommt die sogenannte «4-Punkt-Methode» zum Einsatz: Dabei wird ein beliebiger Punkt im Raum - in diesem Fall die Spitze einer einfachen Stahlplatte (Bild S.52 oben) - aus vier möglichst unterschiedlichen Armstellungen heraus angefahren. Als Messpunkt dient dazu die eigens angefertigte Referenzspitze des Greifers, welche nach der Prozedur wieder abmontiert werden kann. Das System des Roboters berechnet anschließend aus den vier gespeicherten Armstellungen die Abmessungen des Greifers und setzt an die Referenzspitze den Ursprung eines eigenen Werkzeugkoordinatensystems. Dies ist wichtig für die Programmierung und Steuerung der Roboterbewegungen, da dieser nun in der Lage ist nicht nur nach einem übergeordneten, «globalen» Koordinatensystem zu manövrieren, sondern zusätzlich seine eigenen x-, y- und z-Achsen besitzt, was die Kontrolle erheblich vereinfacht.

Danach kann der Ursprung - falls gewollt - noch per numerischer Eingabe verschoben werden. Aus praktischen Gründen wurde deshalb der Nullpunkt in die Mitte der beiden Griffflächen gelegt, da dort später beim Packen des Rohrs auch dessen Längsachse liegen sollte. Die dazu erforderlichen Maße konnten den Konstruktionsplänen entnommen werden. Durch diesen Schritt konnten die Berechnungen für die Bewegungen des Roboterarms weiter vereinfacht werden.

Mit dem vermessenen Werkzeug am Roboterkopf konnten nun auch die Aufbauten der Peripherie aufgenommen werden. Dies dient zum Einrichten eines weiteren Koordinatensystems, der sogenannten Basis. Durch dieses dritte xyz-System ist der Roboter in der Lage präzise in seinem Arbeitsfeld zu manövrieren und sich daran - unabhängig von dessen Position im Raum - anzupassen. In diesem Fall wurde die Längsachse des in die Peripherie eingelegten Rohrs als x-Achse eingegeben und deren Berührungspunkt als gedachte Tangente an die Biegerolle als Ursprung gewählt. Dieser Schritt erleichtert wiederum das Verfahren und Programmieren des Roboters erheblich, da dieser nun in der Lage ist zwischen 3 Bezugssystemen hin- und herzuschalten und sich so relativ zu den gerade relevanten Koordinaten steuern lässt.



Mobiles Kontrollpanel des Roboters vom Typ KCP2

7.MÖGLICHKEITEN DER ROBOTERSTEUERUNG

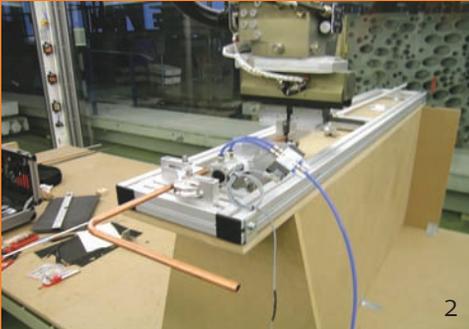
Der Roboter wird über ein Programm gesteuert, das seine Daten für die Bewegungen in der Regel aus zwei zusammengehörigen Dateien entnimmt, die in einer eigenen Programmiersprache, der KUKA Robot Language (KRL), geschrieben sind. Dies ist zum einen die Quelldatei mit der Endung .src, sowie ein File, das als Datenbibliothek dient und mit der Endung .dat gekennzeichnet ist. Die Quelldatei dient dabei im Prinzip der Koordination der Bewegungen sowie dem Steuern des gesamten Ablaufs, inklusive der zusätzlichen Erweiterungen wie etwa des pneumatischen Systems. Um die dafür benötigten Daten, beispielsweise anzufahrende Punktkoordinaten, Achsstellungen oder Geschwindigkeiten zu erlangen, greift sie auf das .dat-File zurück, welches die entsprechenden Werte enthält. Um diese beiden Dateien zu erstellen, gibt es prinzipiell zwei Optionen, das sogenannte «Teachen» sowie das händische Programmieren der Skripte.

PROGRAMMIEREN

Die klassische Methode zum Erstellen von Skripten. Dazu werden die Programmcodes in der entsprechenden Programmiersprache, hier KRL, geschrieben und auf das Steuerungssystem des Roboters aufgespielt.

TEACHEN

Das Teachen ist eine sehr direkte und intuitive Vorgehensweise den Roboter zu programmieren. Dazu wird dieser über ein mobiles Kontrollpaneel (S.54) von Hand gesteuert. Die angefahrenen Punkte oder auch Achsstellungen und ganze Bewegungsabläufe können währenddessen gespeichert werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit über das Kontrollpaneel weitere Eingaben zu machen. So kann man einzelne Bewegungen aneinander reihen und ggf. weiter modifizieren. Die fertigen Abläufe können anschließend automatisch vom Roboter ausgeführt werden und sind nach Belieben weiter veränderbar.



Exemplarischer Biegedurchgang bestehend aus zwei Bewegungsabläufen:
1 - 3 Vortrieb + evtl. Rotation des Rohrs
4, 5 Biegen des Rohrs

8.DATENGENERIERUNG

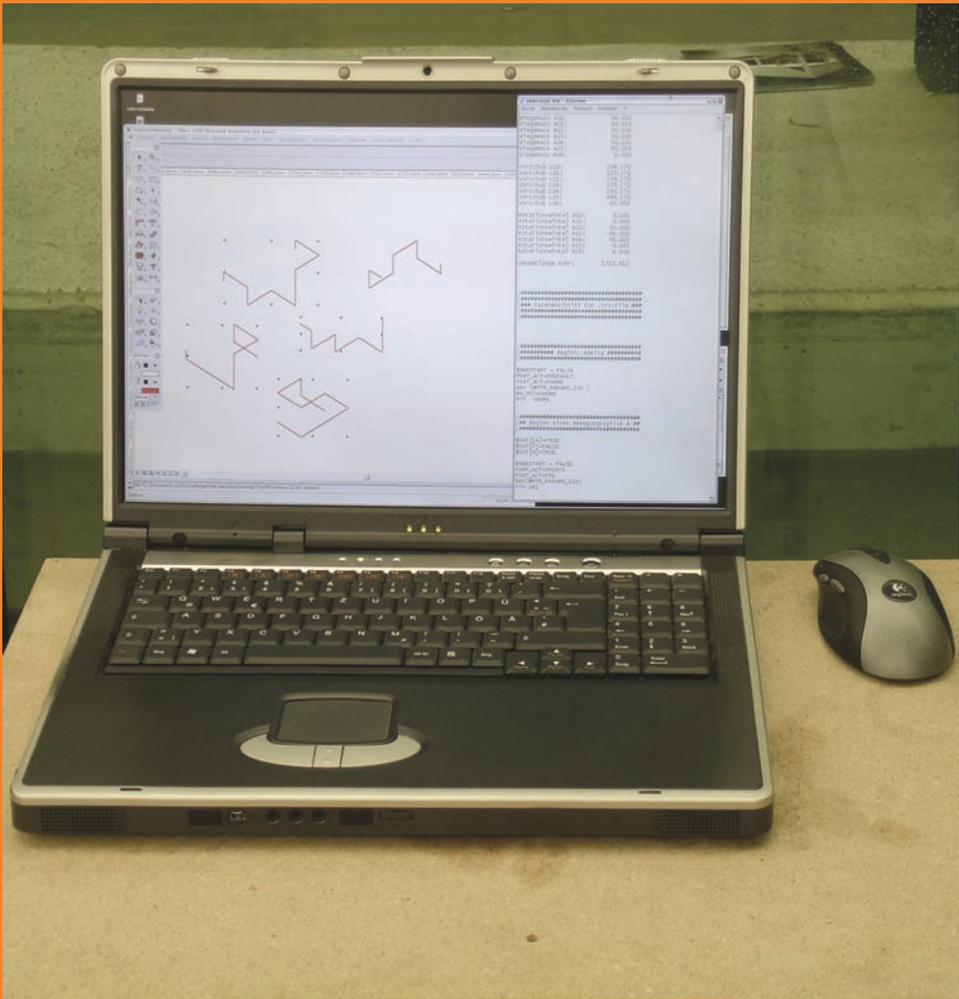
8.1 Prinzip

Der Vorgang des Biegens ist in seinem Ablauf stets derselbe. Er besteht im Wesentlichen aus der Aneinanderreihung von zwei sich wiederholenden Bewegungsabläufen, erstens dem Vortrieb und der Rotation des Rohrs, zweitens der eigentlichen Umformung. Was sich von Werkstück zu Werkstück unterscheidet, ist zum einen die Anzahl der Durchgänge der beiden Bewegungsabläufe, was durch die Zahl der Knicke bestimmt wird, die das Rohr am Ende haben soll. Zum anderen sind es die Daten und Maße der Bewegungen selbst, die von den zu biegenden Rohrgeometrien abhängen. Das heißt das Biegen eines 90° Winkels läuft prinzipiell gleich ab wie das Biegen von 30° , außer dass sich der Roboter mit seinem Werkzeug nur $1/3$ so weit um die Biegerolle herum bewegen muss, um das Rohr in die gewünschte Form zu bringen.

Deshalb erschien es sinnvoll ein kleines «Musterprogramm» zu erstellen, das die beiden erwähnten Bewegungsabläufe exemplarisch ausführt. Der Einfachheit halber wurde dazu die Methode des Teachens gewählt. Ergebnis war ein kleines Programm, das alle notwendigen Elemente enthielt und in der Lage war ein Rohr mit einer bestimmten Biegung zu versehen.

Der nächste Schritt bestand daraus, eine Methode zu finden, die dieses Programm als Ausgangsmaterial nimmt und dessen Grundgerüst mit jeweils neuen Daten füllt, um so verschiedene Rohrgeometrien biegen zu können. Der besondere Anspruch bestand darin, ein eigenes Programm zu schreiben, das diese Aufgabe vollautomatisch übernimmt, so dass aus beliebigen «gedachten» Polygonen ohne Umschweife die dazugehörigen Biegeprogramme für den Roboter generiert werden können.

Umgesetzt wurde dies mit einem in der Programmiersprache VektorScript geschriebenen Programm, das in der Lage ist, direkt aus der CAD-Umgebung von VektorWorks, beliebige dreidimensionale Polygone in für den KUKA Roboter lesbare Dateien zu übersetzen, so dass diese ohne weitere Zwischenschritte mit dem vorliegenden Versuchsaufbau gebogen werden können.



VektorWorks-Oberfläche mit einigen Polygonen und einem generierten Skript-File

8.2 VektorScript

Gewählt wurde die Programmiersprache VektorScript aus mehreren Gründen. Sie ist nicht nur relativ einfach zu beherrschen und durch ihr lineares Abarbeiten des Codes sehr logisch strukturiert, sie eignet sich auch bestens für geometrische Berechnungen. Da sie zum CAD-Programm VektorWorks gehört und in dessen Bedienoberfläche arbeitet, kann auf zusätzlich, aufwendig zu programmierende Import/Export-Tools verzichtet werden. Durch das für Planer vertraute Arbeitsumfeld kann das **bender**-Skript sofort und ohne weiter erforderliche Kenntnisse bedient werden.

Das Bild links zeigt die Benutzeroberfläche von VektorWorks mit einigen dreidimensionalen Polygonen. Im Textfeld auf der rechten Seite des Bildschirms ist der Anfang einer vom **bender**-Skript erzeugten Textdatei zu sehen, die direkt das .src- und .dat-File enthält, welche nur noch auf den Rechner des Roboters geladen werden müssen, um eines der Polygoneometrien biegen zu können.

Der Arbeitsprozess zur Erstellung eines Rohres läuft nun also wie folgt ab: Anfangs wird eine Geometrie in Form eines 3D-Polygons benötigt. Dieses kann erzeugt werden, indem es einfach gezeichnet wird, durch Importieren - beispielsweise als .dxf-Datei - über die üblichen Schnittstellen von VektorWorks, oder indem es durch ein anderes VektorScript generiert wird.

Anschließend muss nur das **bender**-Skript gestartet werden. Das Programm bittet sogleich den Nutzer, das zu biegende Polygon per Mausklick auszuwählen. Hat man dies getan, erscheint eine Dialogbox mit der Aufforderung, Speicherort und Name für die nun entstehende Datei zu wählen. Nach der Eingabe dieser Daten wird vollautomatisch ein Textfile generiert und gespeichert. Das berechnete Polygon färbt sich zum Abschluss rot, um zu signalisieren, dass es bereits bearbeitet wurde.

Nun kann der Nutzer die eben erzeugte Textdatei öffnen. Sie besteht aus drei Teilen: der erste Abschnitt dient als Kontrollblatt für den Biegevorgang. Darin sind alle relevanten Werte auf einen Blick ersichtlich, also die einzelnen Biegewinkel, die Rotationen und Vortriebe zwischen den Knicken, sowie die Gesamtlänge des Rohrs, um es vor dem Biegen ablängen zu können. Die zweiten und dritten Abschnitte der Textdatei enthalten die Maschinencodes für die vom Roboter benötigten .src- und .dat-Files. Diese braucht man nur herauszukopieren und auf den KUKA-Rechner zu überspielen.

Damit ist alles getan um mit dem Biegen starten zu können. Es muss nur noch ein Rohr in die Maschine eingelegt werden, schon kann der Roboter mit seiner Arbeit beginnen. Binnen weniger Minuten hält man ein Rohr in Händen, das exakt der Geometrie des gezeichneten Polygons entspricht.

```

1 PROCEDURE Bender;
2 CONST
3     Biegerollenradius = 30;
4     ueberBiegen = 7.5;
5     biegeHebel = 75.0;
6 VAR
7     PickedPoly : HANDLE;
8     AnzahlVert : INTEGER;
9     i, j, k, m, n, o, p, q, r, s, t, u, v, w, li : INTEGER;
10    pickX, pickY, vertX, vertY, vertZ : REAL;
11    vertexStoreArray : DYNARRAY[] OF POINT3D;
12    vektorStoreArray : DYNARRAY[] OF VECTOR;
13    vektorLengthArray : DYNARRAY[] OF REAL;
14    fileName : STRING;
15    angleCheck, vektorALength, vektorBLength, reflengthOrthogonal, reflengthWinkel : REAL;
16    angleBetweenVektorsStoreArray : DYNARRAY[] OF REAL;
17    BiegewinkelA : DYNARRAY[] OF REAL;
18    halberBiegewinkel : REAL;
19    abzugRundungArray : DYNARRAY[] OF REAL;
20    Vorschubl : DYNARRAY[] OF REAL;
21    bogenArray : DYNARRAY[] OF REAL;
22    lengthTotal : REAL;
23    normalenVektor : VECTOR;
24    normalenVektorArray : DYNARRAY[] OF VECTOR;
25    rotationAngleBeforeCheck, rotationAngle : REAL;
26    streckeRefA, streckeRefB, streckeRefC, streckeRefD : REAL;
27    RotationR : DYNARRAY[] OF REAL;
28    checkRotation, checkVorschub, numbOfSteps : LONGINT;
29    counter : INTEGER;
30    vorschubUnterteilt : REAL;
31    startpunkt, hilfspunkt, endpunkt : POINT;
32    punktRot : HANDLE;
33 BEGIN
34
35
36 {##### zu untersuchendes Polygon per Maus auswählen #####}
37
38 Message('Polygon auswählen!');
39
40 GetPt(pickX, pickY);
41 PickedPoly := PickObject(pickX, pickY);
42 SetSelect(PickedPoly);
43 SetPenFore(PickedPoly, 65535, 0, 0);
44
45 AnzahlVert := GetVertNum(PickedPoly);
46
47 ALLOCATE vertexStoreArray[o..(AnzahlVert - 1)];
48 ALLOCATE vektorStoreArray[o..(AnzahlVert - 2)];
49 ALLOCATE vektorLengthArray[o..(AnzahlVert - 2)];
50 ALLOCATE angleBetweenVektorsStoreArray[o..(AnzahlVert - 3)];
51 ALLOCATE BiegewinkelA[o..(AnzahlVert - 2)];
52 ALLOCATE abzugRundungArray[o..(AnzahlVert - 3)];
53 ALLOCATE Vorschubl[o..(AnzahlVert - 2)];

```

8.3 Vorstellung Skript

An dieser Stelle soll das **bender**-Skript kurz vorgestellt werden. Aufgrund seiner Länge ist es leider nicht möglich, es hier in vollem Umfang zu zeigen (es kann auf der beiliegenden CD eingesehen werden). Deshalb wird nur der erste Teil besprochen, der alle relevanten Berechnungen enthält. Die zweite, nicht abgedruckte Hälfte des Skripts ist im Wesentlichen zuständig für das Schreiben und Speichern der Textdatei, die direkt alle Daten für den Roboter enthält. Die Berechnungen im Skript können in mehrere Abschnitte gegliedert werden und teilen sich wie folgt auf:

DEFINITION VON KONSTANTEN UND VARIABLEN (Zeile 1 - 34)

Zu Beginn des Programms werden die Konstanten und Variablen definiert. Im CONST-Block sind Angaben hinterlegt, die für das ganze Skript gelten. In diesem Fall sind dies für das Biegen relevante Werte, die vom Nutzer immer wieder geändert werden müssen, weshalb sie hier, leicht zu finden, gebündelt am Anfang des Skripts platziert sind. Der Biegerollenradius etwa ist abhängig von der auf der Maschine montierten Rolle. Diese gibt es in variierenden Größen um verschiedene Biegeradien erzeugen zu können. Montiert der Nutzer also eine andere Rolle, kann er im Skript den Radius ändern und erhält so weiterhin genaue Daten. Im VAR-Block sind sämtliche Variablen aufgelistet, die im Skript verwendet werden. An dieser Stelle müssen sie definiert werden, d.h. der Autor gibt an, ob es sich um eine Variable handelt, die für Zahlen, Wörter, Punktkoordinaten... steht.

POLYGON AUSWÄHLEN (Zeile 35 - 57)

Dieser Skriptteil bringt nach dem Starten ein Dialogfeld auf den Bildschirm, das den Nutzer auffordert ein Polygon auszuwählen. Hat er das getan, wird es markiert und mit einer temporären Bezeichnung versehen, damit das Programm weiter darauf zugreifen kann.

Dann wird ermittelt wie viel Vertices, also Eckpunkte der Linienzug hat. Dies ist der wichtigste Wert, da er im ganzen Skript bestimmt, wie viele Durchläufe es in den einzelnen Berechnungen gibt. Auf ihn werden deshalb auch die Längen aller Arrays abgestimmt (Zeile 47ff). Das sind eine Art Container, in denen ganze Reihen von Werten abgespeichert werden können.

```

54 ALLOCATE bogenArray[o..(AnzahlVert - 3)];
55 ALLOCATE normalenVektorArray[o..(AnzahlVert - 3)];
56 ALLOCATE RotationR[o..(AnzahlVert - 2)];
57
58
59 {##### Vertices holen #####}
60
61 PutFile('Select the file to create:', 'vertices.txt', fileName);
62 Message(fileName);
63
64 IF NOT DidCancel THEN BEGIN
65     FOR i := 0 TO (AnzahlVert - 1) DO BEGIN
66         GetPolyPt3D(PickedPoly, i, vertX, vertY, vertZ);
67         vertexStoreArray[i].x := vertX;
68         vertexStoreArray[i].y := vertY;
69         vertexStoreArray[i].z := vertZ;
70     END;
71 END;
72
73
74 {##### Vektoren zwischen den einzelnen Vertices bestimmen (Vektor 0 = Strecke von Vertex 0 nach Vertex 1 #####}
75
76 FOR j := 0 TO (AnzahlVert - 2) DO BEGIN
77     vektorStoreArray[j].x := vertexStoreArray[j+1].x - vertexStoreArray[j].x;
78     vektorStoreArray[j].y := vertexStoreArray[j+1].y - vertexStoreArray[j].y;
79     vektorStoreArray[j].z := vertexStoreArray[j+1].z - vertexStoreArray[j].z;
80 END;
81
82
83 {##### Längen der Vektoren #####}
84
85 FOR n := 0 TO (AnzahlVert - 2) DO BEGIN
86     vektorLengthArray[n] := sqrt(sqrt(vektorStoreArray[n].x) + sqrt(vektorStoreArray[n].y) + sqrt(vektorStoreArray[n].z));
87 END;
88
89
90 {##### Bestimmen der Winkel zwischen den Vektoren > angleStoreArray[o] ist der erste Winkel (bei Vertex 1) #####}
91
92 FOR k := 0 TO (AnzahlVert - 3) DO BEGIN
93     angleCheck := AngBVec(vektorStoreArray[k], vektorStoreArray[k+1]);
94
95     {#### Check, ob Innen- oder Außenwinkel ####}
96
97     {## Bestimmung einer Referenzstrecke > reflLength wäre Hypotenuse wenn Vektor 1 + 2 senkrecht aufeinander stünden ##}
98     reflLengthOrthogonal := sqrt(sqrt(vektorLengthArray[k]) + sqrt(vektorLengthArray[k+1]));
99     {## Bestimmung der Vergleichsstrecke > Länge zwischen Vertex vor Winkelpunkt + Vertex nach Winkelpunkt ##}
100    reflLengthWinkel := sqrt(sqrt(vertexStoreArray[k+2].x - vertexStoreArray[k].x) + sqrt(vertexStoreArray[k+2].y - ...
    ...vertexStoreArray[k].y) + sqrt(vertexStoreArray[k+2].z - vertexStoreArray[k].z));
101    {## Wenn reflLengthWinkel > reflLengthOrthogonal dann muss der Winkel größer als 90° sein (und andersrum) ##}
102    IF (angleCheck <= 90) THEN BEGIN
103        IF (reflLengthWinkel >= reflLengthOrthogonal) THEN angleBetweenVektorsStoreArray[k] := 180 - angleCheck;
104        IF (reflLengthWinkel < reflLengthOrthogonal) THEN angleBetweenVektorsStoreArray[k] := angleCheck;
105    END;

```

SPEICHERN DER VERTICES (Zeile 58 - 72)

An dieser Stelle bittet das Programm den Benutzer einen Speicherort für die zu erzeugende Textdatei anzugeben. Nach der Eingabe eines Namens beginnt das Skript die einzelnen Punkte des ausgewählten Polygons durchzugehen und deren Koordinaten in einem Array zu speichern. Mit diesen XYZ-Werten kann dann alles weitere berechnet werden.

BERECHNUNG DER VEKTOREN (Zeile 73 - 88)

Anschließend berechnet das Skript die Vektoren zwischen den Eckpunkten und ermittelt deren Längen. Diese sind allerdings nicht die tatsächlichen Strecken zwischen den Rohrbiegungen, denn die Vertices repräsentieren nur die Eckpunkte des Linienzugs! Das gebogene Rohr spart diese Ecken immer aus, indem es mit einer runden Kurve abkürzt. Diese hängt vom Radius der beim Biegen verwandten Biegerolle ab und verkürzt die Rohrlänge so um ein bestimmtes Stück. Die tatsächlichen Längen der einzelnen Rohrabchnitte werden erst später im Skript berechnet, während die hier ermittelten Vektoren lediglich Hilfsdaten sind, die für die weiteren Kalkulationen benötigt werden.

WINKEL ZWISCHEN DEN VEKTOREN > A-DATEN (Zeile 89 - 122)

Das Berechnen der Winkel zwischen den Vektoren bringt die ersten wesentlichen Biegedaten. Sie sind direkt übertragbar auf die Winkel, die sich später in den Rohrbiegungen wiederfinden. Für Biegemaschinen werden sie in der Regel mit «A» wie Angle (engl. Winkel) bezeichnet.

Bei diesen Berechnungen musste darauf geachtet werden, dass das Skript den richtigen Winkel wählt. Zwei sich schneidende Vektoren spannen stets vier Winkel auf - zwei Innen- und zwei Außenwinkel, beide einmal positiv, einmal negativ vorhanden. Diese Unterscheidung ist wichtig um später nicht ungewollt den Gegenwinkel zu 180° zu bekommen oder das Rohr versehentlich zwar um den richtigen Wert aber in die falsche Richtung zu biegen.

```

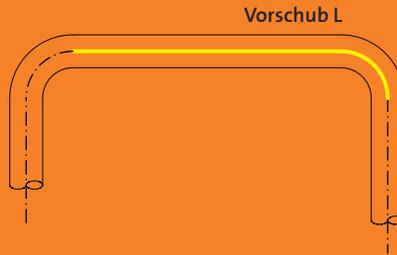
106 IF (angleCheck>90) THEN BEGIN
107     IF (refLengthWinkel >= refLengthOrthogonal) THEN angleBetweenVektorsStoreArray[k] := angleCheck;
108     IF (refLengthWinkel < refLengthOrthogonal) THEN angleBetweenVektorsStoreArray[k] := 180 - angleCheck;
109 END;
110
111 {##### Biegewinkel A = 180° - Winkel zwischen den Vektoren #####}
112
113 BiegewinkelA[k] := 180 - angleBetweenVektorsStoreArray[k];
114 IF (k<10) THEN WriteLn('Biegemass Ao', k, ': ', BiegewinkelA[k]:16:3);
115 IF (k>=10) THEN WriteLn('Biegemass A', k, ': ', BiegewinkelA[k]:16:3);
116 END;
117
118 BiegewinkelA[AnzahlVert - 2] := 0 - ueberBiegen;
119 IF (AnzahlVert - 2<10) THEN WriteLn('Biegemass Ao', AnzahlVert - 2, ': ', ueberBiegen + BiegewinkelA[AnzahlVert - 2]:16:3);
120 IF (AnzahlVert - 2>=10) THEN WriteLn('Biegemass A', AnzahlVert - 2, ': ', ueberBiegen + BiegewinkelA[AnzahlVert - 2]:16:3);
121 WriteLn("");
122
123
124 {##### Bestimmen der Längen der zu biegenden Rohrabschnitte #####}
125
126 {## Längen der spitzen Ecken ##}
127 FOR m := 0 TO (AnzahlVert - 3) DO BEGIN
128     halberBiegewinkel := Deg2Rad(0,5 * angleBetweenVektorsStoreArray[m]);
129     abzugRundungArray[m] := Biegerollenradius / Tan(halberBiegewinkel);
130 END;
131
132 {## Kreisau schnittlängen > Längen der runden Bögen ##}
133 FOR o := 0 TO (AnzahlVert - 3) DO BEGIN
134     bogenArray[o] := (PI * Biegerollenradius * BiegewinkelA[o]) / 180;
135 END;
136
137 {## Vorschub = Länge der Vektoren - spitze Ecken + runde Bögen ##}
138 VorschubL[o] := vektorLengthArray[o] - o - abzugRundungArray[o] + bogenArray[o];
139 WriteLn('Vorschub Loo: ', VorschubL[o]:17:3);
140
141 FOR p := 1 TO (AnzahlVert - 3) DO BEGIN
142     VorschubL[p] := vektorLengthArray[p] - abzugRundungArray[p] - 1 - abzugRundungArray[p] + bogenArray[p];
143     IF (p<10) THEN WriteLn('Vorschub Lo', p, ': ', VorschubL[p]:17:3);
144     IF (p>=10) THEN WriteLn('Vorschub L', p, ': ', VorschubL[p]:17:3);
145 END;
146
147 VorschubL[AnzahlVert - 2] := vektorLengthArray[AnzahlVert - 2] - abzugRundungArray[AnzahlVert - 3] - o;
148 IF ((AnzahlVert - 2)<10) THEN WriteLn('Vorschub Lo', AnzahlVert - 2, ': ', VorschubL[AnzahlVert - 2]:17:3);
149 IF ((AnzahlVert - 2)>=10) THEN WriteLn('Vorschub L', AnzahlVert - 2, ': ', VorschubL[AnzahlVert - 2]:17:3);
150 WriteLn("");
151
152
153 {##### Bestimmen der Rotation zwischen den Biegungen #####}
154
155 FOR r := 0 TO (AnzahlVert - 3) DO BEGIN
156     normalenVektor := CrossProduct(vektorStoreArray[r],vektorStoreArray[r+1]);
157     normalenVektorArray[r] := UnitVec(normalenVektor);
158 END;

```

LÄNGEN DER ROHRABSCHNITTE > L-DATEN (Zeile 123 - 151)

In diesem Abschnitt werden die Längen der einzelnen Rohrabschnitte berechnet. Dabei muss beachtet werden, dass von den Vektoren zwischen den Vertices ein kleines Stück abgezogen werden muss - und zwar die Teile am Anfang und Ende jeder Strecke, die später durch den Rohrbogen ersetzt werden. Stattdessen muss dieser Kreisbogenausschnitt ermittelt und zur Länge addiert werden. Die geraden Anfangs- und Endstücke eines Rohrs besitzen dabei eine gewisse Sonderstellung, da ihnen an jeweils einer Seite ein Kreisbogen fehlt.

Der beim Biegen allgemein mit «L» bezeichnete Vorschub des Rohrs ist also nicht die Strecke von der Mitte eines ersten Knickpunkts zur Mitte des nächsten, sondern wird zusammengesetzt durch eine gerade Strecke und dem darauf folgenden Kreisbogen.



Strecke = Vorschub L des Rohrs zum nächsten Biegepunkt

```

159 RotationR[0] := 0;
160 WriteLn("Rotationswinkel Roo: 0,000");
161
162 FOR s := 0 TO (AnzahlVert - 4) DO BEGIN
163     rotationAngleBeforeCheck := AngBVec(normalenVektorArray[s], normalenVektorArray[s+1]);
164
165     IF (rotationAngleBeforeCheck > 90) THEN rotationAngleBeforeCheck := 180 - rotationAngleBeforeCheck;
166
167     streckeRefA := sqrt(sqrt(vektorStoreArray[s].x + normalenVektorArray[s].x + sqrt(vektorStoreArray[s].y + ...
...normalenVektorArray[s].y) + sqrt(vektorStoreArray[s].z + normalenVektorArray[s].z));
168     streckeRefB := sqrt(sqrt(vektorStoreArray[s].x + normalenVektorArray[s+1].x) + sqrt(vektorStoreArray[s].y + ...
...normalenVektorArray[s+1].y) + sqrt(vektorStoreArray[s].z + normalenVektorArray[s+1].z));
169     streckeRefC := sqrt(sqrt(normalenVektorArray[s].x) + sqrt(normalenVektorArray[s].y) + sqrt(normalenVektorArray[s].z) + ...
...sqrt(normalenVektorArray[s+1].x) + sqrt(normalenVektorArray[s+1].y) + sqrt(normalenVektorArray[s+1].z));
170     streckeRefD := sqrt(sqrt(normalenVektorArray[s+1].x - normalenVektorArray[s].x) + sqrt(normalenVektorArray[s+1].y - ...
...normalenVektorArray[s].y) + sqrt(normalenVektorArray[s+1].z - normalenVektorArray[s].z));
171
172     IF (streckeRefA <= streckeRefB) THEN BEGIN
173         IF (streckeRefC <= streckeRefD) THEN rotationAngle := rotationAngleBeforeCheck - 180;
174         IF (streckeRefC > streckeRefD) THEN rotationAngle := -rotationAngleBeforeCheck;
175     END;
176     IF (streckeRefA > streckeRefB) THEN BEGIN
177         IF (streckeRefC <= streckeRefD) THEN rotationAngle := 180 - rotationAngleBeforeCheck;
178         IF (streckeRefC > streckeRefD) THEN rotationAngle := rotationAngleBeforeCheck;
179     END;
180
181     RotationR[s+1] := rotationAngle;
182     IF (s<9) THEN WriteLn("Rotationswinkel Ro', s+1, ': ', rotationAngle:10:3);
183     IF (s>=9) THEN WriteLn("Rotationswinkel R', s+1, ': ', rotationAngle:10:3);
184 END;
185
186 RotationR[AnzahlVert - 2] := 0;
187 IF (AnzahlVert - 2<10) THEN WriteLn("Rotationswinkel Ro', AnzahlVert - 2, ': ', RotationR[AnzahlVert - 2]:10:3);
188 IF (AnzahlVert - 2>=10) THEN WriteLn("Rotationswinkel R', AnzahlVert - 2, ': ', RotationR[AnzahlVert - 2]:10:3);
189 WriteLn("");
190
191
192 {##### Bestimmen der Gesamtrohrlänge > Zuschchnitt #####}
193
194 lengthTotal := 0;
195 FOR q := 0 TO (AnzahlVert - 2) DO BEGIN
196     lengthTotal := lengthTotal + VorschubL[q];
197 END;
198 WriteLn("Gesamtlänge Rohr: ", lengthTotal:15:3);
199 WriteLn("");
200
201 {##### geschriebenes Textfile noch schließen #####}
202
203 Close(fileName);
204 Message("file "" , fileName, "" created");
205 END;
206
207 Run(Bender);

```

ROTATION ZWISCHEN DEN BIEGUNGEN > R-DATEN (Zeile 152 - 190)

Der dritte für das Biegen essentielle Wert stellt die Rotation R dar. Sie gibt an um wieviel das Rohr zwischen zwei Biegungen um seine eigene Längsachse gedreht werden muss. Da jeder einzelne Knick des Rohrs für sich genommen in einer Ebene liegt, die gesamte Geometrie aber durchaus dreidimensional geformt sein kann, muss das Werkstück zwischen 2 Biegungen in die jeweils nächste Biegeebene rotiert werden.

Dazu ermittelt das Skript aus den zwei Vektoren vor und nach jeder Biegung die dadurch aufgespannte Ebene und bildet den dazugehörigen Normalenvektor. Diese Normalenvektoren können dann verglichen werden, denn der von ihnen gebildete Winkel ist gleichzeitig die gesuchte Rotation R.

Auch hier bedarf es einiger Zusatzberechnungen, denn ähnlich wie beim Ermitteln der A-Daten spannen die beiden sich schneidenden Normalenvektoren insgesamt vier Winkel auf. Um Irrtümer zu vermeiden, muss mathematisch überprüft werden, welcher der gesuchte ist.

GESAMTROHRLÄNGE (Zeile 191 - 200)

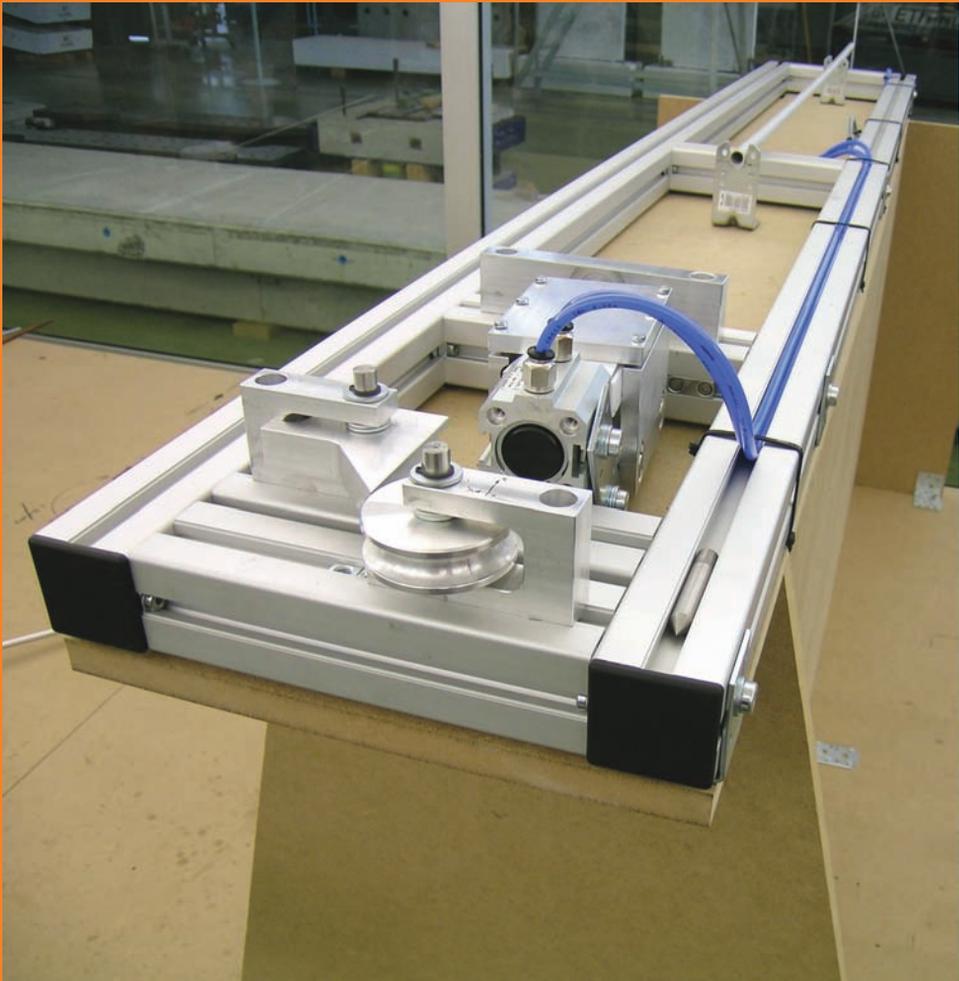
Im letzten Abschnitt der Berechnungen wird die Gesamtlänge des Rohrs ermittelt. Dies ist zwar nicht wichtig um die Biegedaten für den Roboter zu erstellen, dient aber dem Nutzer als Kontrollwert und als Maßvorgabe zum Ablängen des Rohrs.

ZWEITER SKRIPTTEIL: DATEN ÜBERSETZEN UND AUSGEBEN

Im zweiten, hier nicht abgedruckten Skriptteil greift das Programm auf die eben vorgestellten Daten zurück und übersetzt sie für den Roboter. Das heißt beispielsweise, dass eine L-Strecke in die Koordinaten eines Anfangs- und eines Endpunkts umgewandelt wird.

Das Skript geht alle relevanten Werte durch und generiert den entsprechenden Maschinencode als Textdatei. Dieser Code besteht dann im Wesentlichen aus vom Roboter anzufahrenden Punkten, zusätzlich versehen mit weiteren Informationen, wie etwa Fahrgeschwindigkeiten oder Neigungswinkeln des Roboterkopfs.

Ein exemplarisches Skriptpaar für den Roboter (eine .src- sowie eine .dat-Datei, geschrieben in der KUKA Robot Language) kann auf der beiliegenden CD eingesehen werden.

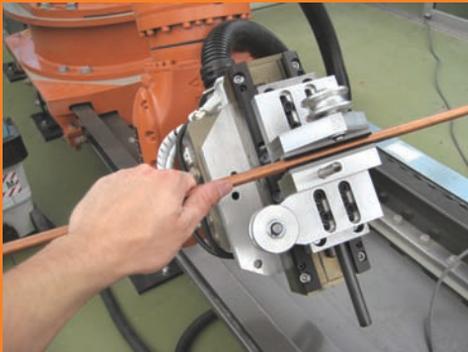


Die fertig eingerichtete Peripherie. Die Halterung für die Biegerolle wurde später auf die andere Seite montiert, wodurch größere Winkel gebogen werden konnten. Dadurch erweiterte sich der maximale Biegewinkel von etwa 95° auf über 140° .

9. BIEGEN

9.1 Test Maschine + Feineinstellung

Nach Fertigstellung des Aufbaus konnten erste Tests mit der Maschine gemacht werden, die im Großen und Ganzen zur vollsten Zufriedenheit abliefen. Bis auf kleinere Anpassungen taten alle Werkzeuge einen guten Dienst - besonderes Augenmerk galt den beiden Greifern, da sie zwei zentrale Teile der Anlage sind. Doch sowohl die Roboterhand als auch der Klemmgreifer an der Peripherie waren problemlos in der Lage das Rohr fest zu packen. Insbesondere beim Klemmkeil war zunächst unsicher ob er nicht zu glatt ist und das Rohr durchgleiten lässt, da an dieser Stelle kein EVA-Schaum als Rutschsicherung angebracht werden konnte. Doch die Befürchtungen erwiesen sich als unbegründet und der passgenaue Klemmmechanismus fixierte das Rohr ausgezeichnet.



Der erste Versuch, ob der Robotergreifer in der Lage ist, das Rohr fest zu halten. Die EVA-Beschichtung erwies sich als sehr rutschfest.



Auch die ersten Tests mit dem Klemmgreifer waren zufriedenstellend. Der pneumatische Kurzhubzylinder brachte ausreichende Kraft auf.



Verschiedene Tests; Links: zu schnell gebogen > Rohr knickt ab; Rechts: ohne Sandfüllung gebogen > deutliches Abflachen im Biegebereich.



Bessere Resultate: Mit den richtigen Einstellungen lassen sich sauber geformte Biegungen erzielen.



Unterschiedliche Metalle: Kupfer, Aluminium, Stahl; Rechts: Referenzstücke um die Einstellungen zu testen.

9.2 Materialtest + erste Biegeversuche

Gleich zu Beginn der Biegeversuche wurden diverse Tests durchgeführt um verschiedene Materialien und Maschineneinstellungen zu untersuchen. Bei den eingesetzten Metallen - gebogen wurden Kupfer, Aluminium und Stahl - gab es keine wesentlichen Differenzen in der Qualität der Resultate. Lediglich die Maschineneinstellungen mussten etwas anders gewählt werden, da die Metalle naturgemäß unterschiedliche Stoffeigenschaften besitzen.

Einen großen Einfluss auf die Biegequalität üben allerdings die verschiedenen Parameter der Roboterskripte aus. Hauptsächlich relevant sind die Geschwindigkeit und der Hebelarm, d.h. wieviel Abstand zwischen der Biegerolle und dem Werkzeug des Roboters ist. Fährt der Roboter zu schnell, wird die Biegung ungenau, neigt mehr zur Ovalisierung des Querschnitts oder knickt sogar ganz ab.

Gute Erfahrungen wurden mit Rohren gemacht, die mit Sand befüllt waren. Dieser stabilisiert das Werkstück von innen und sorgt für eine saubere Rundung, da ein Abflachen im Knick weitestgehend vermieden wird. Zudem beugt er der Faltenbildung im Innenbereich vor. Das Bild unten rechts zeigt den allerersten Biegeversuch, bei dem noch kein Sand zum Einsatz kam. Deutlich sind die Falten zu erkennen. Nach dem Sammeln einiger Erfahrungen konnten jedoch sehr saubere Umformungen mit äußerst zufriedenstellenden Resultaten gemacht werden.

Ein weiteres Augenmerk galt dem Ermitteln weiterer Parameter wie dem «Überbiegen». Da das Rohr nach dem Umformen stets ein gewisses Stück zurückfedert, muss der Biegewinkel um einen entsprechenden Faktor vergrößert werden. Dieser Wert muss empirisch ermittelt werden und schwankt je nach Material.



Der erste Versuch.



Das erste gebogene Rohr! Noch mit Falten, aber prinzipiell ein Erfolg.



9.3 Start der Produktion

Nach all den theoretischen Vorbereitungen bestand im Oktober und November 2006 dann für drei Wochen die Möglichkeit, die Roboteranlage der Professur für Architektur und Digitale Fabrikation zu nutzen und «projekt **bender**» ausgiebig in der Praxis zu testen. Die Biegemaschine war aufgebaut, eingerichtet und hatte die ersten Versuchsreihen absolviert, somit stand der Produktion «richtiger» Teile nichts mehr im Weg.

Anfangs wurden noch verschiedene Muster-Polygone gebogen, um die Grenzen der Maschine auszuloten und gewisse Parameter weiter zu justieren. Im Prinzip funktionierte alles problemlos, doch konnte vor allem am Bewegungsablauf des Roboters noch einiges optimiert werden. Beispielsweise für das Nachgreifen beim Vortrieb des Rohrs galt es noch sinnvolle Grenzen zu ermitteln: Das Untergestell der Peripherie ist so gebaut, dass das Rohr mit einer Bewegung nur etwa 50cm vorgeschoben (L) und $\pm 35^\circ$ rotiert (R) werden kann. Ist es aufgrund der zu biegenden Polygeometrie nötig, das Rohr zwischen zwei Biegungen weiter als diese Strecke zu versetzen oder um einen größeren Winkel zu rotieren, muss der Roboterarm nachgreifen. Das VektorScript, das die Biegedaten erzeugt ist allerdings so konzipiert, dass es diese Tatsache berücksichtigt und die Bewegungen ggf. automatisch stückelt. So ist gewährleistet, dass auch größere L- und R-Werte vom Roboter bewältigt werden können.



Beim Positionieren des Rohrs für die nächste Biegung reicht der Platz manchmal nicht aus, so dass der Roboter nachgreifen muss. Dies wird allerdings im Skript berücksichtigt und automatisch veranlasst.



9.4 Bewährungsprobe: Biegen «richtiger» Projekte

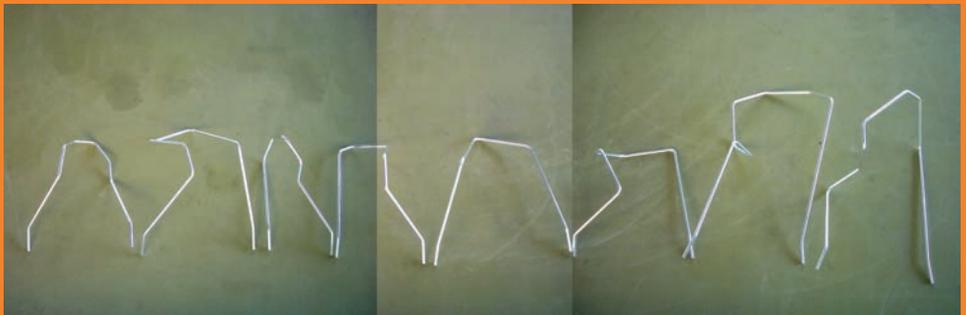
STUHL VON MATTHIAS ZÄH

Um die Fähigkeiten von «projekt **bender**» zu demonstrieren, sollten einige kleine Projekte verwirklicht werden. Da Matthias Zäh, ebenfalls Teilnehmer des MAS05/06, für seine Einzelarbeit einen parametrisch aufgebauten Stuhl aus gebogenem Rohr designt hatte, lag es nahe mit ihm zusammen einige Exemplare seines Stuhls zu biegen. Er erklärte sich bereit, die Daten zur Verfügung zu stellen und bei der Produktion zu helfen.

Der Stuhl besteht aus acht unterschiedlich geformten Einzelrohren, die über bestimmte Raumpunkte und Abhängigkeiten definiert werden und sich so gegenseitig beeinflussen. Das von Matthias Zäh erstellte, parametrisch aufgebaute 3D-Modell des Stuhls kann auf verschiedene Arten modifiziert werden, so dass ganz unterschiedliche Varianten der Sitzgelegenheit entstehen, wovon zwei oder drei mit **bender** produziert werden sollten. Ergebnis waren in der Form variiere Modelle des Stuhls, die provisorisch mit Klebeband, bzw. Metallkabelbindern montiert wurden. Trotz des noch prototypischen Stadiums funktionieren die Stühle und strahlen eine besondere Ästhetik aus.

Auf der linken Seite sieht man Bilder aus dem Produktionsprozess sowie von den fertigen Sitzgelegenheiten. Krönender Abschluss des Arbeitstages war das Probesitzen - die Stühle sind tatsächlich erstaunlich bequem.

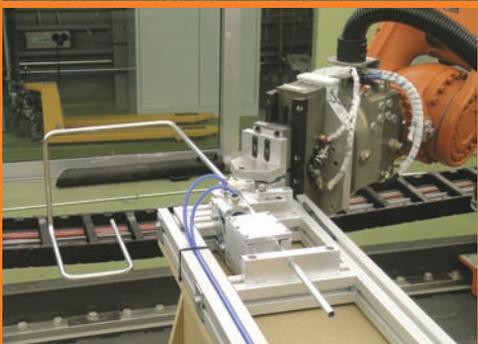
Folgeseiten: einer der Prototypen; die einzelnen Rohre sind mit Hilfe von Metallkabelbindern aneinander befestigt



Acht unterschiedlich gebogene Rohre: einer der Stühle vor seiner Montage.







RÄUMLICHE GITTERSTRUKTUR

Ein weiteres Ergebnis der Biegeversuche ist diese auf einem Raster basierende Gitterstruktur. Ein von dem Nachdiplomstudent Tobias Wendt (ein weiterer Teilnehmer des MAS 05/06) geschriebenes VektorScript erzeugt ein 3D-Polygon, das sich in ein vom Nutzer definiertes Raster legt. Dabei durchwandert es die Knotenpunkte dieses fiktiven Raumgitters und bildet so eine komplexe Struktur.

Wie die daraus entstehenden Objekte eingesetzt werden, bleibt dem Ideenreichtum des Nutzers überlassen - aufgrund der Flexibilität des Systems sind die Verwendungsmöglichkeiten unbegrenzt. Je nach Dichte der Struktur eignen sich die Raumgitter hervorragend als Tragsystem. Einige gebaute Varianten größeren Maßstabs wurden beispielsweise bereits als Regale eingesetzt. In diesem konkreten Fall soll die Gitterstruktur - versehen mit einer Deckplatte - als Beistelltisch für eine Lesecke dienen.

Da an diesem Objekt nur Winkel von 90° zu biegen waren, ließ sich der Produktionsprozess recht genau vorhersagen, wodurch die Teile im Vorfeld so gestückelt werden konnten, dass keine Kollisionsprobleme zu erwarten waren. Erschwert wurde das Biegen dann jedoch durch den kleinen Maßstab. Da die einzelnen Biegungen teilweise recht eng beieinander lagen, hatte der Roboterarm manchmal Mühe den Biegepunkt anzufahren. Doch aufgrund der Möglichkeit darauf flexibel reagieren zu können, war die Maschine in der Lage, diese Problemen stets zu umgehen. So konnten durch einfaches Ändern der Armstellung auch Biegungen gesetzt werden, die mit einem starr agierenden Systemen vielleicht nicht möglich gewesen wären.



Die einzelnen Rohre der Raumstruktur vor dem Zusammensetzen.



Präsentation der Arbeit vor den Professoren, Mitarbeitern und Studenten der beiden Professuren CAAD und D FAB ARCH

10.EPILOG

Insgesamt kann man sagen, dass «projekt **bender**» äußerst erfolgreich verlief. In Anbetracht des engen Zeitrahmens war es Anfangs nicht klar, ob das Projekt in seiner Gesamtheit durchzuführen war. Doch erfreulicherweise reichte es nicht nur zur Planung und zum Bau der Biegemaschine, sie konnte sogar so weit getestet und optimiert werden, dass es zum Schluss möglich war ein paar richtige Objekte zu biegen. Der ganze Planungs- und Fertigungsprozess lief dabei - zur Freude des Verfassers - nahezu problemlos ab. Die einzelnen Werkzeuge von «projekt **bender**» funktionierten einwandfrei und konnten bis auf wenige kleinere Modifikationen so eingesetzt werden wie sie geplant wurden. Auch der Programmierteil, also das Schreiben und Übersetzen der Skripte, konnte mit all seinen geometrischen Kniffeleien gelöst werden. Natürlich gibt es auch Aspekte, die verbessert oder gänzlich anders gemacht hätten werden können. Allen voran der etwas konservative Aufbau der Maschine selbst. Das Biegen mit dem Roboter hätte hier ein progressiveres Vorgehen ermöglicht. Doch um den finanziellen und zeitlichen Rahmen nicht zu sprengen und um das ganze Projekt bis zur Praxis bringen zu können, wurden gewisse Einschränkungen in Kauf genommen und das System so entwickelt, dass es in Anbetracht der Umstände realisiert werden konnte. Desweiteren hätte der Aufbau der Peripherie weiter minimiert werden können, um eine noch größere Flexibilität zu erreichen. Diese Einschränkung konnte allerdings akzeptiert werden, da ein Umbau zusätzlichen Aufwand bedeutet hätte, für die eigentliche Funktion der Maschine aber keine Rolle spielte.

Abschließend kann man nur sagen, dass es großen Spaß gemacht hat an «projekt **bender**» zu arbeiten. Besonders interessant war dabei, das Projekt von der ersten Idee bis zum arbeitenden System zu entwickeln. Trotz der Änderungen und Umplanungen, die eine solche Arbeit stets begleiten, konnte die Anfangsidee bis zum Schluss verfolgt und auch umgesetzt werden. Mit Blick auf die von der Professur für CAAD gelehrtten Arbeitsabläufe und -strategien war es außerdem erfreulich, dass das Prinzip der «Digitalen Kette» mit «projekt **bender**» exemplarisch in seiner Gesamtheit durchgespielt werden konnte. Das Erzeugen der notwendigen Daten am Computer, sowie ihr anschließend lückenloser Transfer auf den Roboter, der dann sofort in der Lage ist, diese in die Realität umzusetzen, zeigt die hohe Flexibilität und Praktikabilität von «projekt **bender**» und der digitalen Kette.



DANK

Ohne die Unterstützung einiger Personen und Einrichtungen wäre «projekt **bender**» sicherlich nicht zu Stande gekommen, weshalb ich ihnen an dieser Stelle meinen Dank aussprechen möchte. In loser Reihenfolge sind dies:

- **Prof. Dr. Ludger Hovestadt, Philipp Schaeerer sowie die Assistenten der Professur für CAAD**

Ihnen danke ich nicht nur für die gute Organisation und Betreuung des gesamten MAS-Kurses, sondern speziell auch für die Unterstützung der Idee einer Roboter-Biegemaschine.

- **Prof. Fabio Gramazio und Prof. Matthias Kohler, Professur für Architektur und Digitale Fabrikation**

Für das mir entgegen gebrachte Vertrauen und das zur Verfügung stellen der Roboterversuchsanlage.

- **Tobias Bonwetsch und Mike Lyrenmann, ebenfalls Professur für Architektur und Digitale Fabrikation**

Für ihr umfangreiches Wissen, das sie mit mir teilten, hauptsächlich das Beherrschen des Roboters betreffend. Aber auch für die zahlreichen Tipps und Ideen bei der Planung und Programmierung von «projekt **bender**», sowie ihre freundschaftliche Unterstützung.

- **Matthias Zäh**

Für das zur Verfügung stellen der Produktionsdaten seines Stuhls aus gebogenem Rohr, sowie für seine tatkräftige Hilfe beim Biegen der Objekte.

- **Herr Jenni, Leiter der Mechanischen Werkstatt des D-BAUG, ETH**

Ganz besonders danken möchte ich Werkstattchef Herrn Peter Jenni, der viel Zeit und Arbeitskraft geopfert hat, um die Aluminium-Werkzeuge zu produzieren und im Vorfeld mit seinem technischen Wissen half, den Aufbau von «projekt **bender**» zu optimieren.

APPENDIX

Abstract

Die dem Projekt zu Grunde liegende Aufgabenstellung, wie sie zu Beginn der Arbeit formuliert wurde:

Im Rahmen der Abschlussarbeit 2006 des MAS Kurses am CAAD-Lehrstuhl der ETH Zürich, soll untersucht werden, inwieweit sich ein CNC gesteuerter Roboter eignet, um Metallrohre mit geringen Durchmessern zu biegen. Nach einer Analyse bereits existierender Biegeverfahren wird geprüft werden, welche Methode sich am besten auf einen Roboter adaptieren lässt bzw. ob es neue Möglichkeiten gibt, damit Rohre dreidimensional im Raum zu biegen. Dabei wird untersucht, welche Vor- und Nachteile das Umformen der Rohre mit einem 6-Achs-Roboter gegenüber herkömmlichen CNC-Biegemaschinen hat und ob es eventuell sogar ganz neue Möglichkeiten bietet. Im Besonderen soll erforscht werden, inwiefern die Viel-Gelenkigkeit des Roboters als Vorteil genutzt werden kann und ob dies neue Verfahren des Biegens hervorbringt. Nach einem theoretischen Arbeitsteil ist geplant, mit dem Roboter praktische Versuche zu unternehmen und dabei zu testen, ob sich eine solche Maschine für die vorliegende Aufgabenstellung eignet.

Quellennachweise

EINBEZOGENE FACHLITERATUR

- Greg G. Miller, «Tube Forming Processes - A Comprehensive Guide», Dearborn : SME, 2003
- Marco Nock, «Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen - Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens», Bamberg : Meisenbach, 2005
- Reimund Neugebauer, Günter Laux - EFB-Forschungsbericht Nr. 221, «Komplexe FEM-Simulation von Rohrbiegevorgängen», Hannover : Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung, 2004

BILDER UND TEXTPASSAGEN

- S.7 Einleitung, Textauszüge:
Homepage der Professur für CAAD, <http://wiki.arch.ethz.ch>
- S.10-13 Überblick Rohrbiegeverfahren, sämtliche Illustrationen sowie Textauszüge:
TRACTO-TECHNIK GmbH, «Grundlagen des Rohrbiegens – Eine Einführung in die Rohrbiegetechnologie»
- S.14 u. 15 Überblick Rohrbiegeverfahren, Illustration, Abbildung sowie Textauszüge:
«Fraunhofer Magazin 2.2001» Seite 44ff
Fraunhofer IWU: <http://www.iwu.fraunhofer.de/german/angebot/projekte/hexabend/>
- S.16 Überblick Rohrbiegeverfahren, Abbildung Freiformbiegen:
Homepage Dr. Michael Thalmair, <http://www.thalmair.de/freibieg.html>
- S.17 Überblick Rohrbiegeverfahren, Textauszüge Freiformbiegen:
Michael Thalmair, «Freie räumliche Umformung schlanker Werkstücke»

- S. 16 u. 17 Überblick Rohrbiegeverfahren, Abbildung sowie Textauszüge Twister:
Homepage Rosenberger AG, http://www.rosenbergerag.de/content/german_publish/rosenberger.html
KUKA Roboter AG, Bericht R 249, 16.2.2004
- S. 18, 21 u. 22 Vorstellung KUKA KRL 150 L110, Abbildungen und Diagramme:
Broschüre «Robot_and_mechanical_design_Germ», KUKA Roboter AG
Datenblatt «kr_150_2», KUKA Roboter AG
Datenblatt «spez_kr_150_2», KUKA Roboter AG
- Abbildungen S. 20, 73 u. 80:
Seong Ki Lee
- Abbildungen S. 72, 74 oben links, oben rechts, Mitte links, unten links, unten rechts sowie S.75:
Matthias Zäh

Anlage: Datenträger

Auf der beiliegenden CD befinden sich weitere Informationen zu «projekt **bender**». Da das Hinzufügen von zusätzlichem Bildmaterial sowie das Abdrucken der gesamten Programmskripte den Rahmen dieses kleinen Buches gesprengt hätten, können diese als Anlage auf dem Datenträger eingesehen werden.

Außerdem entstand während der praktischen Arbeitsphase ein kurzer Videofilm, der im Quicktime-Format ebenfalls auf der CD zu finden ist. Er zeigt auf kurzweilige Art und Weise die Biegemaschine bei der Arbeit sowie die Produktion einer der Rohr-Stühle von Matthias Zäh.

INHALT CD

- Video «projekt **bender**»
- Bildmaterial in Präsentationsform
- VektorScript zum Analysieren von 3D-Polygonen und Erzeugen der dazugehörigen Roboter-Daten
- Exemplarische .src-Datei (KUKA Robot Language) in Textform
- Exemplarische .dat-Datei (KUKA Robot Language) in Textform
- Das vorliegende Dokument im PDF-Format mit hoher Auflösung
- Das vorliegende Dokument im PDF-Format mit geringer Auflösung

