
Automatisierte Spritzarmsteuerung

AUTOMATED SHOTCRETE APPLICATION

OTTO TSCHUMI

Der Robojet ist ein elektro-hydraulisch angetriebener Manipulator und wird vorwiegend im Tunnelbau eingesetzt. Er wird eingesetzt zum Naß- oder Trockenspritzen von Beton.

Die neue Maschine basiert auf dem weltweit bekannten und bewährten Prinzip des Robojets. In Zusammenarbeit zwischen Industrie und Universität wurde für diesen mit 8 Freiheitsgraden ausgerüsteten Manipulator ein neues, benutzerfreundliches und automatisches Kontrollsystem entwickelt. Dieses neue Instrument ermöglicht es die Maschine voll manuell, halb automatisch oder vollautomatisch in ausgewählten Tunnelabschnitten zu betreiben. In einem der Betriebsmodi benutzt der Bediener einen 6-D Joystick (Spacemouse). Die Berechnung der Kinematik wird durch das Kontrollsystem übernommen. Ein Laser-Scanner vermisst dabei die Tunnelgeometrie vorgängig und diese Information wird verwendet um automatisch die Spritzdistanz und den Spritzwinkel einzuhalten. Das Ziel dieses Kontrollsystems ist es nicht die gesamte Spritzbetonarbeit zu automatisieren, sondern die Arbeit zu vereinfachen und dem Bediener ein intelligentes Instrument in die Hand zu geben um in einer effizienten und qualitativ hochstehenden Weise zu arbeiten.

Mit korrektem Winkel und genauer Spritzdistanz werden wesentliche Einsparungen im Rückprall und damit in den Kosten erreicht. Weiter, wenn das Tunnelprofil nach dem Spritzvorgang nochmals vermessen wird, kann das System Angaben über die gespritzte Schichtstärke liefern, was bis heute nur mittels Kernbohrungen und Vermessung dieser möglich war. Wird eine genaue Form der Endschale benötigt, so ermöglicht es das System, automatisch dieses definierte Endprofil zu spritzen.

The Robojet is an electric-hydraulic actuated manipulator, mainly used in tunnel construction work. It is used to spray ready mixed (wet mix) shotcrete or dry mix shotcrete on the tunnel walls.

A new machine, based on the well known kinematic principles of the Robojet, has now been developed in cooperation with industry and academia. This manipulator with eight degrees of freedom has a new automatic and human oriented control system. The new tool enables an operator to manipulate the spraying jet in various modes, from purely manual to semi-automatic and fully automatic, within selected underground areas.

In one of the modes the operator uses a six directional "joystick" (the SpaceMouse). The calculation of the kinematics is done by the control system. A laser scanner sensor measures heading geometry and this

information is used to control automatically the standoff distance and the angle of the spraying jet. The aim of this control is not to automate the whole job of spraying but to simplify the task and enable the operator to use the robot as an intelligent tool, and to work in an efficient way with a high level of quality.

With a correct angle of application and constant spraying standoff distance, a remarkable reduction in rebound and therefore savings in cost is achieved. Further, if the heading profile is measured after spraying as well, the system will relay information on the thickness of the applied shotcrete layer, which up to today was only possible with core drilling and measurement. If an exact final shape of the heading profile is required, the control system manages the robot to spray to these defined limits automatically.

1. Einleitung

Weltweit wird Spritzbeton im Tunnelbau zur Fels-sicherung und auch als Endauskleidung eingesetzt. Reparaturen oder zusätzliche, z.B. feuerfeste Auskleidungen können ebenfalls im Spritzverfahren erfolgen.

Die Spritzarbeit ist oft gefährlich, anstrengend und deshalb auch ermüdend, falls diese noch von Hand geführt erfolgt. Dies gilt ganz besonders für große aufzutragende Mengen oder für Arbeiten im Naßspritzverfahren.

Obwohl noch wie vor auf vielen Baustellen die Düse noch von Hand geführt wird, ist der Trend Manipulatoren für diese Arbeiten einzusetzen zunehmend.

Dies ist insbesondere der Fall bei Sicherungsarbeiten um den Düsenführer aus der Gefahrenzone zu nehmen und ebenfalls, wenn große aufzutragende Mengen zu verarbeiten sind und/oder wenn große Tunnelquerschnitte bearbeitet werden müssen.

Mit Manipulatoren kann auch eine Steigerung der Produktivität und der Qualität erreicht werden.

2. Stand der Technik

Wird ein Manipulator, wie er heute auf dem Markt erhältlich ist eingesetzt, so wird der Düsenführer zum Bediener der Maschine, welcher die Bewegungen des Manipulators steuert. Die Maschine trägt dabei die Düse und führt die gewünschten Bewegungen aus.

Gewisse Bewegungen kann die Maschine auch selbsttätig übernehmen.

Der Bediener kontrolliert dabei die Bewegungen mittels Fernbedienung über Kabel oder Funk.

Da wendige Manipulatoren bis zu 16 unabhängige Bewegungen ausführen können, ist es unumgänglich die Bediener entsprechend zu schulen. Selbst an einen erfahrenen Bediener stellt die Spritzarbeit hohe Anforderungen an die Konzentration.

Im Weiteren ist zu beachten, daß es nach wie vor schwierig ist, den korrekten Spritzwinkel und Düsenabstand einzuhalten, wenn über Kopf oder in großer Distanz gespritzt wird.

Was ein nicht korrekter Abstand und ein falscher, nicht senkrecht zur Felsoberfläche stehender Spritzwinkel zur Folge hat, ist in *Bild 1* zu sehen. Die dargestellten Angaben sind bestens bekannt und gelten für die Anwendung mit Trockenspritzbeton. Wird Naßspritzbeton eingesetzt, so ist das qualitative Verhalten identisch, jedoch sind die Rückprallwerte stark reduziert. Das heißt auch hier führt ein nicht korrekter Spritzwinkel und Abstand sofort zu erhöhten Rückprallwerten.

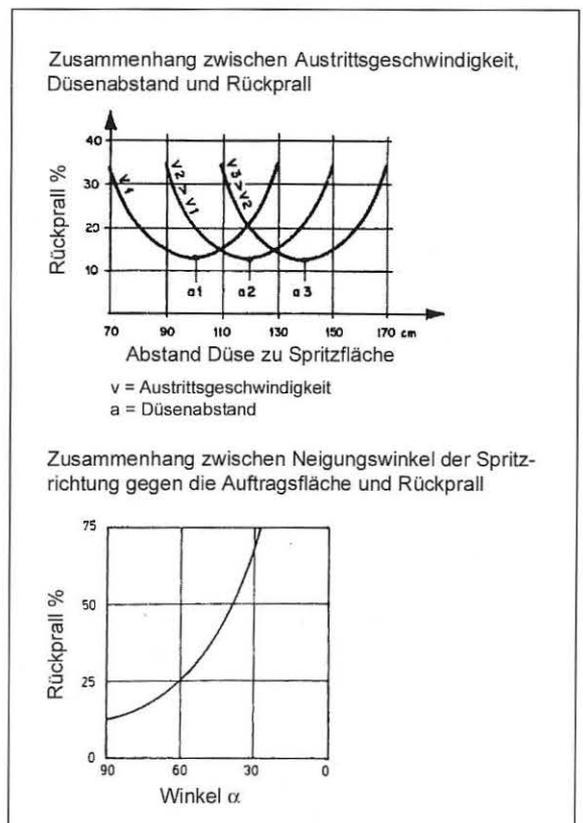


Bild 1: Rückpralldiagramm nach Linder

Wird ein Spritzmanipulator eingesetzt, so können bereits massive Verbesserungen im Bezug auf Sicherheit, Produktivität und Qualität erreicht werden. Es ist aber nach wie vor schwierig, das Qualitäts- und Produktivitätsniveau konstant hoch zu halten. Zudem erfordert das gut geschultes Personal.

Nach getaner Spritzarbeit ist es bis heute nicht möglich ohne partielle Zerstörung der Spritzschicht eine Aussage über die gespritzte Schichtstärke machen zu können. (Kernbohrungen)

3. Konvertierung eines Manipulators in einen Roboter

Eine neue Maschine, basierend auf dem weltweit bekannten und bewährten Prinzip des Robojet wurde entwickelt. In Zusammenarbeit zwischen Industrie und Universität wurde für diesen mit 8 Freiheitsgraden ausgerüsteten Manipulator ein neues, benutzerfreundliches und automatisches Steuerungssystem entwickelt. Dieses neue Instrument ermöglicht es die Maschine voll manuell, halb automatisch oder voll automatisch im Tunnel zu betreiben. In zwei der Betriebsmodi benutzt der Bediener einen 6-D Joystick (Spacemouse). Die Berechnung der Kinematik wird durch das Kontrollsystem übernommen. Ein Laser-Scanner vermisst dabei die Tunnelgeometrie vorgängig und diese Information wird verwendet um automatisch die Spritzdistanz und den Spritzwinkel einzuhalten. Die 8 Freiheitsgrade stellen an die

Softwareentwicklung hohe Anforderungen, da das System mehrfach redundant ist.

Das Berechnungsmodell basiert auf inverser Kinematik, das heißt, zu einem vorgegebenen Weg des Spritzstrahls auf der Felsoberfläche wird eine Bewegungsvorschrift für die einzelnen Gelenke bestimmt. Die Redundanzen werden durch geschickte Kopplung einzelner Gelenke umgangen (Bild 2).

4. Sensoren, Aktoren

Der elektro-hydraulisch angetriebene Spritzmanipulator wurde mit robusten Absolut-Gelenkstellungssensoren, wovon 7 die Drehwinkel der einzelnen Gelenke und einer die Linearbewegung des Teleskops mißt, ausgerüstet. Diese Sensoren ermöglichen es jederzeit die exakte Stellung der einzelnen Gelenke gegenüber dem nächsten Gelenk und damit auch gegenüber dem fixierten Trägerfahrzeug zu bestimmen.

Alle Sensoren sind handelsüblich und wurden für diese Anwendung nicht speziell entwickelt.

Eine einfache druckgeregelt, mit Elektromotor betriebene Hydraulik-Einheit liefert die Energie zum Antrieb des Roboters. Die Bewegungen werden über handelsübliche hydraulische Regelventile erzeugt. Die Anforderung an die Ölqualität ist hierbei nicht höher, als die für Baumaschinen übliche. Die Hydraulikventile besitzen eine Handnotbetätigung bei Ausfall des Kontrollsystems.

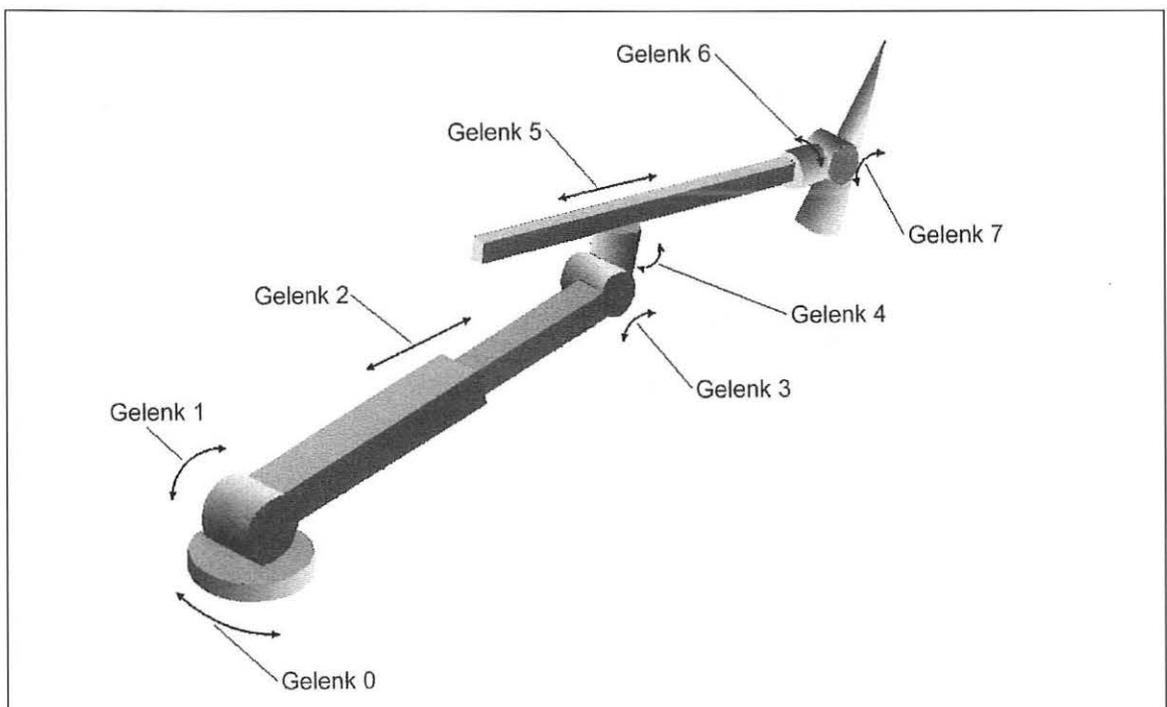


Bild 2: Kinematikschemata

5. Laserscanner

Ein an der Lanzenspitze sitzender Laserscanner (Bild 3) in einer schwenk- und verschließbaren Box kann, wenn benötigt die Tunnelgeometrie vermessen. Der eingesetzte Laser ist ein im Tunnelbau bekanntes Instrument und mißt Distanzen mit Infrarot Licht nach dem Laufzeitverfahren. Der Scanner mißt eine Anzahl Profilschnitte im vorher markiertem Arbeitsbereich.

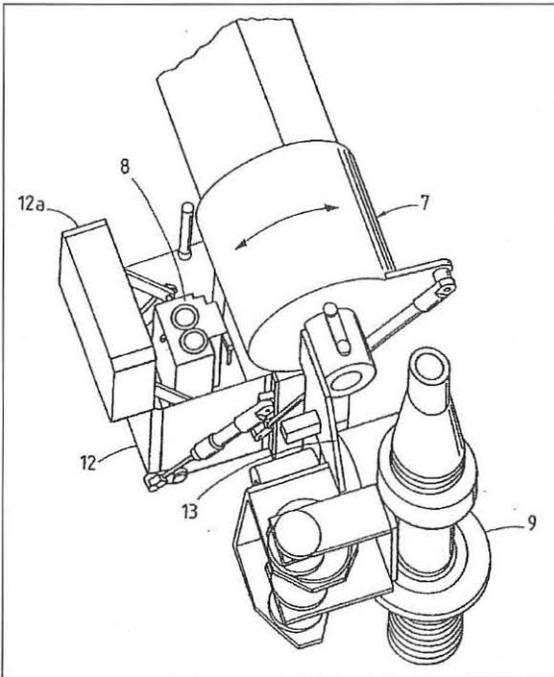


Bild 3: Laserscanner

6. Fernbedienung mit Spacemouse

Weil die Bedienung des Systems und das Erlernen so einfach wie möglich gestaltet werden sollte, wurde besondere Sorgfalt dazu verwendet, die Fernbedienung zu entwickeln. Das Ziel war eine einfach verständliche Benutzerführung zu erhalten, sodaß auch weniger gebildetes Personal den Spritzroboter betreiben kann. Die Fernbedienung ist über Kabel mit dem System verbunden.

Die Benutzerführung wird über zweifarbige Leuchttasten gemacht, wobei diejenige Funktion, die zur Auswahl steht grün und die Funktion welche in Betrieb ist rot leuchtet. Funktionen die nicht zur Verfügung stehen bleiben dunkel. Mit den Leuchttasten wird der Bediener durch einen ganzen Spritzvorgang geleitet.

Die Fernbedienung stellt dabei 3 verschiedene Betriebsmodi zur Verfügung.

1. Manuelles Spritzen
2. Halbautomatisches Spritzen
3. Vollautomatisches Spritzen

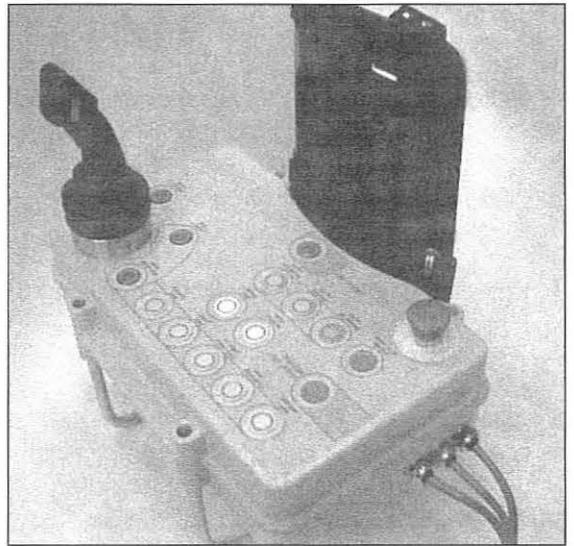


Bild 4: Fernbedienung

Beim manuellen und halbautomatischen Spritzen muß der Bediener dem Roboter noch gewisse Bewegungsinformationen liefern. Vor Beginn einer halb- und vollautomatischen Arbeit muß die Maschine platziert und das Profil ausgemessen werden. Dazu wird an der Fernbedienung die Spacemouse verwendet. Die Spacemouse (Bild 5) ist eine in der Robotik, hier für Baustellenbedürfnisse mit einem Handhebel ausgerüstete, vielfach verwendete Maus mit 6 Freiheitsgraden. Für unsere Anwendung wurde die Maus speziell mit einem zusätzlichen Nässe und Überlastschutz versehen.

Ein durchwegs unabhängiger Notaus-Kreis und ein Totmannschalter vervollständigen das Fernsteuersystem.

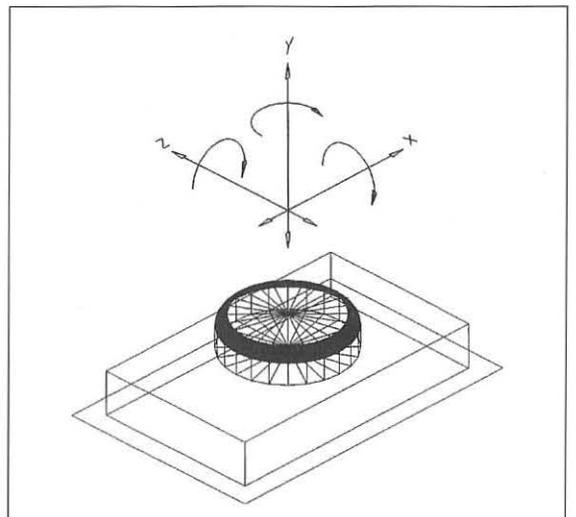


Bild 5: Koordinaten der Spacemouse

7. Userpanel

Um mit dem Robotersystem zu kommunizieren, Einstellungen vorzunehmen und Servicearbeiten durchführen zu können, steht ein Touch-screen panel zur Verfügung. Ein Computer mit einfacher serieller Schnittstelle kann ebenfalls diesem Zweck dienen. Mit dem Userpanel werden vor Beginn oder während der Arbeit wichtige Parameter verstellt, wenn erforderlich. Dies sind:

- Spritzabstand
- Geschwindigkeit der Düse über der Oberfläche
- Abstand zwischen zwei mäanderförmig gespritzten Bahnen (im vollautomatischen Betrieb)

Auf dem Userpanel kann ebenfalls das gemessene Tunnelprofil grafisch dargestellt und in beliebiger Größe, Winkel und Perspektive betrachtet werden.

Für Servicezwecke steht eine weitere Seite zur Verfügung.

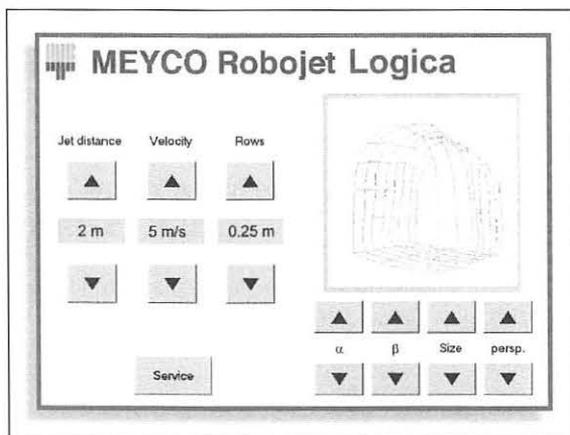


Bild 6: Userpanel

8. Steuerrechner

Alle Komponenten des Roboters sind mit einem im Steuerkasten enthaltenen Steuerrechner über Busverbindungen verknüpft.

Hier laufen alle Daten der einzelnen Module zusammen und der Rechner bestimmt je nach Aufgabe eine bestimmte Bewegungsvorschrift und optimiert die Bewegungsabläufe so, daß eine minimale Oelmenge genügt um die Bewegungen auszuführen.

Die einzelnen Module (Bild 7) sind hierbei:

- Steuerrechner nach Industrienorm mit Flash-EPROM Memory, sowie den nötigen Interfaces

- Roboterstruktur mit Sensoren und Aktoren
- Laserscanner
- Fernbedienung mit Spacemouse
- Touch-screen panel mit Visualisierung und Eingabemöglichkeiten
- Anschluß via Ethernet zur Ferndiagnose oder auch für Wartungszwecke (Internet)etc.

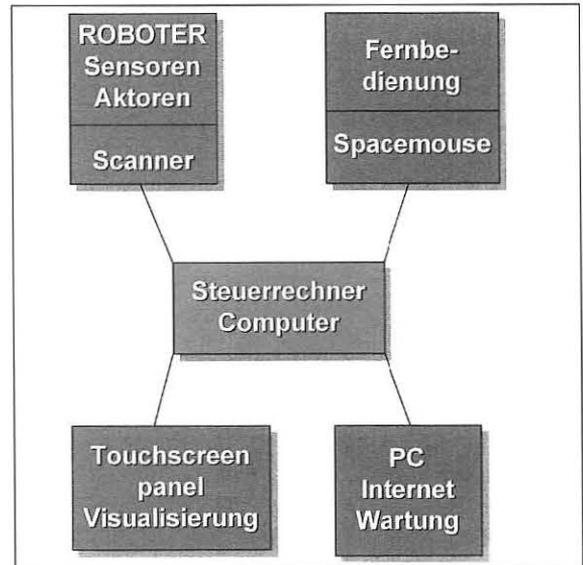


Bild 7: Robotersystem

Die Software ist basierend auf einem Echtzeit Roboter Modul und ist fest eingebrennt. Die Ein- und Ausgabegrößen, und die Kommunikation nach außen ist in einer offenen Architektur aufgebaut.

9. Arbeitsablauf für einen Spritzvorgang

9.1 Manuelles Spritzen

Nach platzierter und stabilisierter Maschine bewegt der Bediener die Düse mit der Spacemouse.

Hierbei kümmert er sich nicht um die Bewegungen der einzelnen Gelenke, sondern führt ganz einfach den Endpunkt des auftreffenden Spritzstrahls der Felsoberfläche entlang und stellt dabei die Düse auch senkrecht und im richtigen Abstand zur Oberfläche.

Die Koordination und die Bestimmung der Bewegungsvorschrift der einzelnen Gelenke übernimmt dabei der Steuerrechner.

Mit der Spacemouse werden also folgende Größen gesteuert:

- Winkel
- Position
- Geschwindigkeit und
- Abstand Düsenspitze-Tunnelwand

Die Arbeit ist dabei so stark erleichtert, daß die Anlernphase wesentlich verkürzt wird und der Bediener sich wirklich auf den Spritzstrahl konzentrieren kann.

Der manuelle Modus ist gedacht um in schwierigen Bedingungen noch spritzen zu können, nämlich dort wo die halb- und vollautomatischen Modi keine zufriedenstellenden Resultate ergeben. Solche Situationen können auftreten bei Hindernissen, Überausbrüchen, oder massiven Einbaubögen oder anderen Beschränkungen.

9.2 Halbautomatisches Spritzen

Um dem Roboter die für einen automatischen Modus nötigen Daten zu vermitteln, muß die Oberfläche des Tunnels nach dem Platzieren der Maschine zuerst vermessen werden.

Dazu markiert der Bediener zuerst den gewünschten Arbeitsbereich mit dem Laserscanner (roter Markierlaser sichtbar) und läßt dann die einzelnen Profilschnitte vermessen.

Die Lanze des Roboters führt dabei den Scanner in Längsrichtung zum nächsten Profilschnitt und die Drehbewegung des Lanzenkopfes sorgt für eine entsprechende Abtastung im jeweiligen Schnitt.

Eine Messung erfolgt immer vor dem Spritzen und je nach Aufgabe eventuell nachher.

Eine Messung simultan während des Spritzens wurde aus verschiedenen Gründen nicht in Betracht gezogen.

Das Meßraster ist dabei 250 x 250 mm und die Meßgenauigkeit (Distanz) ± 10 mm.

Die Meßzeit ist abhängig von der Größe des zu vermessenden Profils und beträgt für einen Abschlag von 4 m ca. 5 Minuten.

Fehlmessungen werden durch eine automatische integrierte Filterfunktion vermieden.

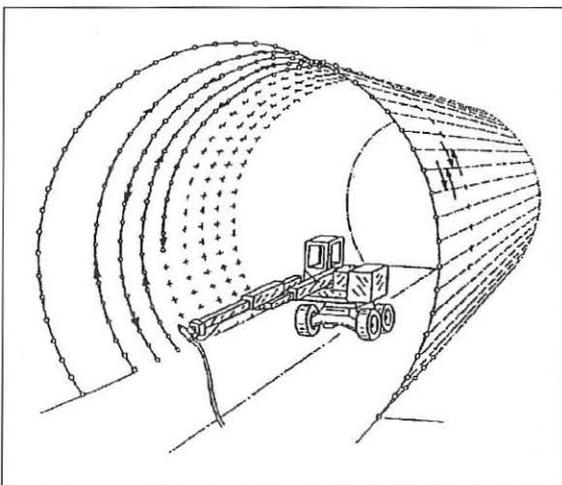


Bild 8: Meßvorgang

Aus den gemessenen Daten - diese können jetzt auf dem Userpanel sichtbar gemacht werden - berechnet sich das Programm eine Bewegungsvorschrift welche die Düse im gesannten Arbeitsbereich stets senkrecht zur Tunneloberfläche und im vorher eingegebenen Düsenabstand hält.

Der Düsenabstand ist dabei typisch zwischen 1,0 und 2,0 m

Der Bediener führt im halbautomatischen Betrieb den Spritzstrahl mit der Spacemouse wobei er nur den Ort, nicht aber den Abstand und den Spritzwinkel verändern kann.

Dieser Modus bietet die größtmögliche Flexibilität für den Bediener, ohne je den Rückprall aufgrund falscher Spritzrichtung und falschem Spritzabstand zu erhöhen.

Dies ist gültig auch für schlecht sichtbare Orte wie über Kopf und Orte weit weg vom Bediener.

- *Automatisch koordiniert sind:*
 - Düse normal zur Oberfläche und
 - Düse im eingegebenen Abstand
 - *Der Bediener steuert:*
 - Position und
 - Geschwindigkeit
- der Düse.

9.3 Automatisches Spritzen

Der Roboter fährt selbsttätig, ausgehend von einem vom Bediener angefahrenen Startpunkt den Arbeitsbereich in mäanderförmigen Bahnen mit der Düse ab. Der Steuerrechner steuert dabei die einzelnen Gelenke so, daß die Düse immer

- normal zur Oberfläche
 - im eingegebenen Abstand und
 - mit der eingegebenen Geschwindigkeit
- zur Wand fährt.

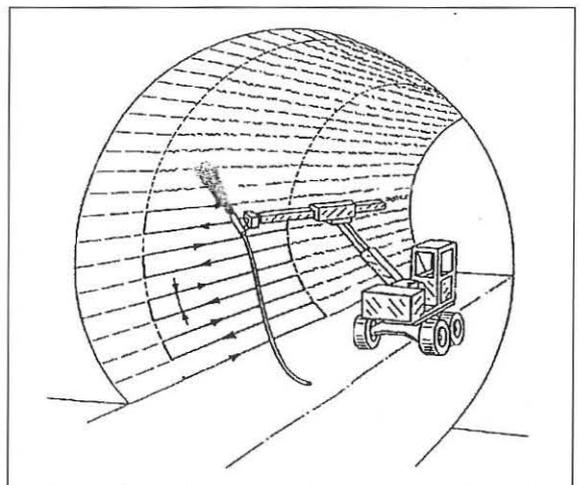


Bild 9: Automatisches Spritzen

Dabei verläuft die Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit über der Oberfläche und nicht entlang einem Gelenk.

10. Vorteile des neuen Systems

Das neue computergesteuerte, profilbezogene Spritzen mit dem Roboter bietet gegenüber herkömmlichen Systemen folgende Vorteile:

- Sehr einfache ergonomische Bedienung
- Durch die einfache Bedienung und den hohen Automatisierungsgrad bleibt dem Bediener mehr Zeit für die Qualitätskontrolle während des Spritzens
- Wesentlich verkürzte Trainingszeiten
- Zeiteinsparung beim Spritzen
- Rückprallreduzierung und damit Material- und Kosteneinsparung durch automatisches Halten des optimalen Düsenwinkels und von auf die jeweilige Arbeitsaufgabe angepaßten Parametern
- Gleichbleibend hohe Qualität und Quantität, unabhängig von Qualifizierungsgrad und Verfassung des Bediener und unabhängig von der geometrischen Beschaffenheit des Felsuntergrundes
- Tunnelvermessung und Spritzen mit nur einer Maschine
- Möglichkeit der nachgängigen Ermittlung der Schichtstärke und aufgetragener Betonmenge durch Differenzmessung

- praktisch unbegrenzte Erweiterungsmöglichkeit in der Funktionalität ohne Veränderung des hochkomplexen Robotiksoftwarekerns durch modulare Softwarestruktur
- Übertragbarkeit auf Systeme mit anderer (einfacherer) Kinematik, dadurch großes Entwicklungspotential

11. Vision

Das System ist für weitere Entwicklungen offen, das heißt neue Erkenntnisse in der Spritztechnik können dem System mitgeteilt werden. So könnten beispielsweise weitere für den Spritzvorgang wichtigen Größen wie Druckluft- und Betonmenge vom selben System, abhängig von der jeweiligen Aufgabe, gesteuert werden.

Das System kann im Hinblick auf Protokollierung und Qualitätssicherung weiterentwickelt werden.

Ein Erhöhen der Automatisierung wie zum Beispiel ein Anbinden an den Tunnelrichtlaser ist denk- und machbar.

Softwareservicearbeiten können mit dem System über Internet erfolgen.

12. Literatur

Linder, R.: Stichwort: Spritzbeton. Bauverlag Wiesbaden und Berlin, 1976.