

# Wandlungsfähig und flexibel: Ein neues Produktionskonzept für die Kunststoffverarbeitung – auch für die Fügetechnik

## Changeable and flexible: A new production concept for plastics processing - for joining technology as well

Dipl. Wirt.-Ing. Christian Hasse, Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Heim, Institut für Werkstofftechnik (IfW), Fachgebiet Kunststofftechnik, Universität Kassel

### Kurzfassung

Um dem steigenden globalen Kosten- und Wettbewerbsdruck in der Kunststoff verarbeitenden Industrie standhalten zu können, bedarf es neuer Fertigungskonzepte. Einen Ansatz dazu bieten wandlungsfähige Produktionssysteme. Sie erlauben dem Unternehmen nicht nur möglichst schnell innerhalb zuvor festgelegter Grenzen auf (Markt-)Veränderungen reagieren zu können (Flexibilität), sondern bei Bedarf auch die Grenzen anpassen zu können (Wandlungsfähigkeit). Am Lehrstuhl für Kunststofftechnik der Universität Kassel wurde das Konzept des wandlungsfähigen Produktionsprinzips aufgegriffen und hinsichtlich der speziellen Anforderungen in der Kunststofftechnik weiterentwickelt. Als Ergebnis dessen konnte eine Pilotanlage in Betrieb genommen werden, bei der die Prinzipien einer wandlungsfähigen Produktion Berücksichtigung finden.

### 1. Einleitung

Insbesondere im Bereich technischer Produkte aus Kunststoff besteht ein starker Trend zur Entwicklung komplexer Artikel und Baugruppen, die infolge eines zunehmenden Kostendrucks entlang der gesamten Zulieferkette vermehrt in einer automatisierten Fertigung hergestellt werden, um weiterhin am Standort Deutschland wettbewerbsfähig produzieren zu können. Dies ist notwendig obwohl, oder gerade weil das Produktionsumfeld hinsichtlich bestimmter Kennzahlen und ihrer jeweiligen Prognose immer unberechenbarer wird: Während zu erkennen ist, dass die Produktlebenszyklen immer kürzer werden und die Losgrößen je Produktionslos weiter sinken, ist in unterschiedlichen Branchen nach wie vor ein starker Anstieg der Variantenvielfalt zu erkennen. Außerdem kommt es darüber hinaus immer häufiger zu stark schwankenden Stückzahlen je Auftrag. Dies stellt Unternehmen bei der Produktions-

planung im operativen Geschäft, aber auch für die Planung strategischer Investitionen in neue Maschinen und Anlagen vor zunehmende Herausforderungen. Ein entscheidender Faktor bei der Beherrschung dieser Herausforderungen liegt in der Entwicklung neuer Fertigungskonzepte. Rein flexible Systeme kommen dabei betriebswirtschaftlich und technologisch meist an ihre Grenzen, da alle „Eventualitäten“ (verschiedene Technologien, Auslegung für unterschiedliche Kennzahlen, Möglichkeit einer Automatisierung usw.) von Anfang an bei der Anschaffung berücksichtigt werden müssen. Um auf interne und externe Impulse reagieren zu können und um den beschriebenen Herausforderungen gleichermaßen gerecht werden zu können, sollte ein System wandlungsfähig sein. Im allgemeinen bran-

### Abstract

There is a need for new fabrication concepts in order to be able to withstand the rising global cost-related and competitive pressure in the plastics processing industry. Changeable production systems offer one approach for this purpose. They allow the company not only to be able to react to (market) changes as quickly as possible within previously stipulated limits (flexibility) but also to be able to adapt the limits too if necessary (changeability). At the Professorship of Plastics Technology at the University of Kassel, the concept of the changeable production principle was taken up and was refined with regard to the special requirements in plastics technology. As a result of this, it was possible to commission a pilot installation in which the principles of changeable production are taken into consideration.

recognised in different sectors. Moreover, there are ever more frequently great fluctuations in the quantities per order. As a result of this, companies are being confronted with increasing challenges not only in relation to the production planning in the operative business but also for the planning of strategic investments in new machines and installations. One decisive factor with regard to meeting these challenges lies in the development of new fabrication concepts. In this respect, purely flexible systems mostly reach their limits as far as business management and technology are concerned since all the "contingencies" (various technologies, designing for different characteristic figures, possibility of automation etc.) must be taken into account from the start during the purchasing process. A system should be changeable in order to be able to react to internal and external stimuli and in order to be able to meet the described challenges in the same way.



Dipl. Wirt.-Ing. Christian Hasse

Profil: [www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=206862](http://www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=206862)  
 profile: [www.joining-plastics.info/?id=206862](http://www.joining-plastics.info/?id=206862)

hasse@uni-kassel.de



Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Heim

Profil: [www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=202972](http://www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=202972)  
 profile: [www.joining-plastics.info/?id=202972](http://www.joining-plastics.info/?id=202972)

### 1. Introduction

Particularly in the field of technical products made of plastic, there is a strong trend towards the development of complex articles and subassemblies which, as a consequence of rising cost-related pressure along the entire ancillary supply chain, are increasingly being manufactured in automated fabrication in order to be able to continue competitive production at the location of Germany. This is necessary although or precisely because the production environment is becoming ever more incalculable with regard to certain characteristic figures and their prediction in each case:

While it is recognisable that the product life cycles are becoming ever shorter and that the batch sizes per production lot are dropping further, an extreme rise in the diversity of variants can still be

chenüblichen Sprachgebrauch und auch in der produktionswirtschaftlichen Fachliteratur werden die Begriffe „Flexibilität“ und „Wandlungsfähigkeit“ häufig nicht ganz klar voneinander abgegrenzt. Dies liegt zum großen Teil daran, dass die Wandlungsfähigkeit nicht unabhängig von der Flexibilität eines Systems gesehen werden kann. Wird von einem Unternehmen beispielsweise von vorn herein ein so hohes Maß an Flexibilität vorgehalten, dass es sich auf alle endogenen und exogenen Veränderungen einstellen kann, ist eine wandlungsfähige Lösung nicht mehr notwendig. Allerdings stellt diese Lösung aus wirtschaftlicher Sicht die unvorteilhafteste dar, weil sie mit einer extrem hohen Kapitalbindung für Komponenten verbunden sein würde, die nur unter Umständen benötigt werden [1].

**1.1 Abgrenzung der Begriffe Flexibilität und Wandlungsfähigkeit**

Um ein besseres Verständnis für die Unterschiede zwischen den bereits am Markt existenten flexiblen Systemen und den für die Kunststoffverarbeitung neu zu entwickelnden wandlungsfähigen Systemen zu vermitteln, soll für die Ausdrücke „Flexibilität“ und „Wandlungsfähigkeit“ im Folgenden eine anschauliche Begriffsbestimmung vorgenommen werden.

Mit dem Begriff „Flexibilität“ wird die Fähigkeit eines Produktionssystems beschrieben, sich schnell und mit nur sehr geringem (finanziellen) Aufwand an veränderte Rahmenbedingungen anzupassen [2]. Allerdings sind dem Flexibilitätsspielraum eines Systems Grenzen gesetzt, die zum Investitionszeitpunkt definiert wurden. Eine Anpassung des Systems ist nur innerhalb dieser Grenzen möglich, jede darüber hinausgehende Veränderung wäre mit immensen (Kosten-) Aufwand verbunden.

Der Begriff der „Wandlungsfähigkeit“ beschreibt hingegen das Potenzial eines Produktionssystems auch über diese Grenzen hinaus organisatorische und technische Veränderungen vornehmen zu können [3]. Es müssen zum Zeitpunkt der Planung des Produktionssystems noch nicht alle Funktionseinheiten (Anlagenkomponenten) vorgesehen werden, die möglicherweise zukünftig zum Einsatz kommen sollen. Noch nicht vorhandene Einheiten können zu einem

späteren Zeitpunkt integriert werden. Damit kann das Unternehmen auftragsbezogen auf sich verändernde Marktbedingungen mit einer Anpassung der Produktionskennzahlen (beispielsweise Schaffung zusätzlicher Kapazitäten, Erhöhung des Technologie- und damit auch des Artikelspektrums, Anpassung des Automatisierungsgrads) reagieren. Wandlungsfähige Produktionssysteme gehen somit über reine Flexibilität hinaus. Sie sind anpassbar über bestehende Grenzen hinweg. Sie befähigen Unternehmen dazu, sich selbstständig auf neue Rahmenbedingungen einstellen zu können und zeichnen sich durch ein hohes Maß an Anpassbarkeit hinsichtlich Varianz, Stückzahlen, Losgrößen usw. aus. Innerhalb der zunächst vorhandenen Grenzen herrscht somit die Möglichkeit der Flexibilität, das Potential diese Grenzen verschieben zu können macht ein System erst wandlungsfähig.

**1.2 Wandlungsbefähiger zur Beschreibung der Wandelbarkeit eines Systems**

Um das Potential zur Wandelbarkeit zu beschreiben, muss das System über bestimmte Eigenschaften verfügen. Diese Eigenschaften werden in der produktionstechnischen Literatur als sogenannte Wandlungsbefähiger bezeichnet. In den unterschiedlichsten Forschungsarbeiten konnte eine Vielzahl Wandlungsbefähiger erarbeitet werden [4], die hierarchisch in primäre und sekundäre Wandlungsbefähiger unterschieden wurden [5]. Zu den primären Wandlungsbefähigern zählen Modularität, Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit und Kompatibilität [6]. Wandlungsbefähiger stellen die individuellen Eigenschaften einer Fertigungseinheit dar, die dem Gesamtsystem die Möglichkeit zum Wandel geben [7]. Mit anderen Worten: Wandlungsbefähiger charakterisieren die Art und das Maß der Anpassbarkeit eines Fertigungssystems.

**1.3 Modularität als zentraler Ansatz für Wandlungsfähigkeit**

Zwar zählen Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit und Kompatibilität auch zu den primären Wandlungsbefähigern, wesentliche Voraussetzung für ein wandlungsfähiges Produktionssystem stellt aber der Wandlungsbefähiger Modularität dar, da dieser als Grundvorausset-

In the general linguistic usage customary in the sector and also in the specialist literature relating to production economics, the "flexibility" and "changeability" terms are frequently not delimited from each other in an absolutely clear form. To a great extent, this is due to the fact that the changeability of a system cannot be seen independently of its flexibility. For example, if a company retains such a high degree of flexibility right from the beginning that it can adjust to all the endogenous and exogenous changes, a changeable solution is no longer necessary. In any case, this solution constitutes the least advantageous one from an economic viewpoint because it would be connected with extremely high tied-up capital for components which are only needed under certain circumstances [1].

**1.1 Delimitation of the terms flexibility and changeability**

In order to impart a better understanding for the differences between the flexible systems already existing on the market and the changeable systems to be newly developed for plastics processing, a definition of the terms "flexibility" and "changeability" is to be made below.

The "flexibility" term serves to describe the capacity of a production system to adapt to altered outline conditions quickly and with an only very small scope of work (and finances) [2]. In any case, limits which were defined at the point in time of the investment are set on the flexibility leeway of a system. The system can only be adapted within these limits. Any change extending beyond this would be connected with an immense scope of work (and costs).

In contrast, the "changeability" term describes the potential of a production system to be able to make organisational and technical changes even extending beyond these limits [3]. At the point in time when the production system is planned, it is not yet necessary to make provision for all the functional units (installation components) which should possibly be utilised in the future. Any units which are not yet present can be integrated at a later point in time. In relation to the orders, the company can thus react to changing market conditions by adapting the characteristic figures of the production (e.g. creation of

additional capacities, increase in the technological spectrum and therefore in the article spectrum too and adaptation of the degree of automation). Thus, changeable production systems extend beyond pure flexibility. They can be adapted across existing limits. They allow companies to be able to independently adjust to new outline conditions and are characterised by a high degree of adaptability with regard to variance, quantities, batch sizes etc. Thus, there is the possibility of flexibility within the initially existing limits. Only the potential to be able to shift these limits makes a system changeable.

**1.2 Changeation enablers in order to describe the changeability of a system**

In order to describe the potential for changeability, the system must have certain properties. In the literature relating to production technology, these properties are designated as so-called changeation enablers. In the most diverse research papers, it was possible to elaborate a large number of change enablers [4] which were hierarchically differentiated as primary and secondary change enablers [5]. The primary change enablers include modularity, universality, mobility, scalability and compatibility [6]. Change enablers represent the individual properties of a fabrication unit which give the overall system the possibility of change [7]. In other words: Change enablers characterise the type and degree of the adaptability of a fabrication system.

**1.3 Modularity as a central approach for changeability**

Although universality, mobility, scalability and compatibility are also included in the primary change enablers, the change enabler modularity constitutes an essential prerequisite for a changeable production system since this is regarded as a basic prerequisite for all the other enablers and thus plays a central role in the configuration of changeable structures. Modularisation results in easier-to-manage partial systems which exhibit physical and functional delimitation and are designated as modules [8]. Thus, quick and simple adaptation and thus the changeability of the system are only possible by creating self-contained standardised modules with interfaces clearly defined to the outside.

zung für alle weiteren Befähiger gilt und somit eine zentrale Rolle bei der Gestaltung wandlungsfähiger Strukturen einnimmt. Durch Modularisierung entstehen einfacher zu beherrschende Teilsysteme mit physischer und funktionaler Abgrenzung, die als Module bezeichnet werden [8]. Somit ist nur durch die Schaffung von in sich geschlossenen standardisierten Modulen mit nach außen klar definierten Schnittstellen eine schnelle und einfache Anpassung und damit eine Wandelbarkeit des Systems möglich. Zwar ist bei Kunststoffverarbeitungsmaschinen eine Modularisierung weit verbreitet, allerdings geht mit ihr nicht gleichzeitig auch die Schaffung von Wandlungsfähigkeit einher. Hierzu ist es notwendig Strukturen zu erzeugen, die über vorhandene Grenzen hinweg wandelbar sind. So muss es, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, beispielsweise möglich sein Funktionseinheiten, die zum Zeitpunkt der Planung der Anlage noch nicht vorhanden sind, zu einem späteren Zeitpunkt in die bestehenden Strukturen der Anlage zu integrieren. Dies ist mit einer ausschließlichen Modularisierung der Anlagentechnik nicht zu erreichen. Dazu müssen auch die anderen Wandlungsbefähiger beachtet werden und erst das Zusammenspiel aus allen Befähigern macht das System wandelbar. Grundsätzlich existieren bei der Modularisierung von Maschinen und Anlagen zweierlei Sichtweisen: die des Herstellers und die des Anwenders [9]. Während der Hersteller durch Modularisierung seinen internen Produktentstehungsprozess vereinfachen möchte, zielt das Anliegen des Anwenders nach einem modularen Aufbau darauf ab, ein System

zu erhalten, das er im besten Fall selbstständig, vor allem aber bedarfsgerecht und mit nur geringem Aufwand funktional anpassen kann. Insbesondere strebt der Anwender eine einfache Integration und Substitution (Rekonfiguration) von Maschinenmodulen an, um den Leistungsumfang der bestehenden Anlage zu verändern. Bislang eigneten sich die meisten existierenden modular aufgebauten Maschinen in der Kunststoffverarbeitung nicht für eine Rekonfiguration beim Anwender und vor allem auch nicht zu einem funktionalen Wandel im Sinne der Wandlungsfähigkeit. Dafür mag es vielfältige Gründe geben. Ein Grund könnte sein, dass die Komplexität der Produkte und damit verbunden auch die Komplexität des Herstellprozesses immer weiter zugenommen haben. Dies spricht eindeutig für die Verwendung spezialisierter Maschinen und Anlagen. Dies spricht aber eigentlich in gleichem Maße für den konsequenten Einsatz eines wandlungsfähigen Systems, da dieses eine bedarfsgerechte Spezifizierung ermöglicht und fördert. Sehr produktspezifische Speziallösungen haben nach wie vor ihre Berechtigung, insbesondere dann, wenn ein Produkt mit sehr großen Stückzahlen, bei geringer Varianz und langen Produktlaufzeiten hergestellt werden soll. Für viele andere Anwendungen bietet wandlungsfähige Maschinenteknik aber sehr großes, noch nicht ausgereiztes Potential.

**2. Beschreibung der wandlungsfähigen Pilotanlage**

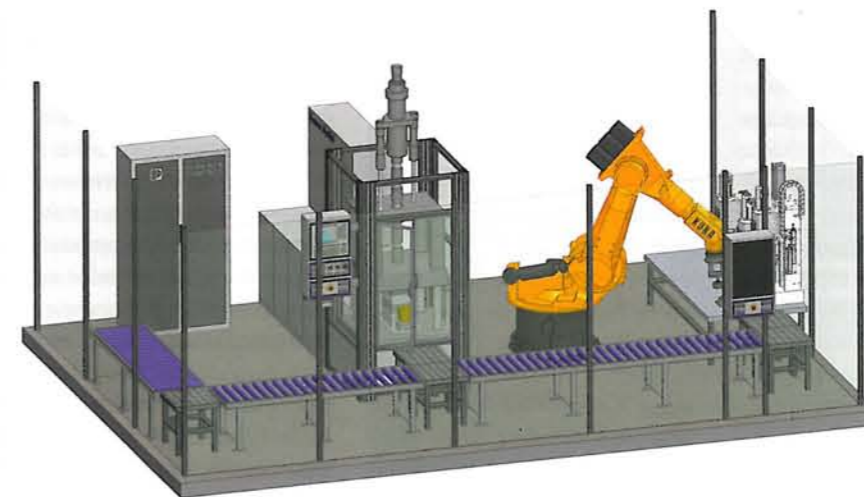
Am Institut für Werkstofftechnik der Universität Kassel (IfW) wurde zusammen mit den Firmen Phoenix Contact GmbH

Although modularisation is widespread in the case of plastics processing machines, the creation of changeability is not also associated with it at the same time. For this purpose, it is necessary to produce structures which are changeable across existing limits. As described in the previous chapter, it must therefore be possible, for example, to integrate functional units which are not yet present at the point in time when the installation is planned into the existing structures of the installation at a later point in time. This cannot be achieved with the exclusive modularisation of the installation technology. To this end, the other change enablers must also be borne in mind and only the interplay between all the enablers makes the system changeable. In principle, two perceptions exist with regard to the modularisation of machines and installations: that of the manufacturer and that of the user [9]. While the manufacturer would like to simplify his internal product development process by means of modularisation, the matter of concern for the user after a modular setup aims to obtain a system which he can adapt functionally not only, in the best case, independently but also, above all, according to the needs and with just a small scope of work. In particular, the user strives for the simple integration and substitution (reconfiguration) of machine modules in order to alter the scope of performance of the existing installation. Until now, most of the existing machines with a modular structure in plastics processing have not been suitable either for reconfiguration in the user's plant or, above all, for a functional transformation in the sense of changeability. There may be diverse rea-

sons for this. One reason could be that the complexity of the products and, connected with this, also the complexity of the manufacturing process have increased ever further. This is clearly a point in favour of using specialised machines and installations. However, to the same extent, this is actually a point in favour of consistently utilising a changeable system since this permits and promotes specification according to the needs. Very product-specific special solutions continue to be justified particularly whenever a product is to be manufactured with very large quantities, slight variance and long product lives. However, for many other applications, changeable machine technology offers very great potential which has not yet been exploited to the full.

**2. Description of the changeable pilot installation**

A pilot installation which offers the potential for adaptation and permits a functional transformation was developed at the Institute of Materials Engineering (IfW) at the University of Kassel together with Phoenix Contact GmbH & Co. KG and Fischer Kunststoff-Schweißtechnik GmbH. On the one hand, the modularisation of the installation technology was, for this purpose, advanced substantially further than has been the case until now. On the other hand, a comprehensive integration capacity of the different modules was also achieved above all. To this end, it was firstly necessary to elaborate the specific requirements of plastics processing methods and to define solutions relating to mechanical engineering. The objectives of this research work were to draw up a changeable fabrication concept for plastics processing and to transfer the solution approaches in a concrete form by constructing a pilot installation. The results of the preliminary work from the planning phase are portrayed on Fig. 1. The CAD graphics show the pilot installation which has a modular structure and consists of two work stations for the injection moulding (left region) and welding (right region) of plastic components. Both work stations comprise several modules which constitute self-contained functional units. For example, a conventional injection moulding machine was not used here. Instead, the work station for injection moulding consists of three units which



**Bild 1: CAD-Konstruktion der Anlage aus der Projektierungsphase**

**Fig. 1: CAD of the installation from the planning phase**

& Co. KG und Fischer Kunststoff-Schweißtechnik GmbH eine Pilotanlage entwickelt, die das Potential zur Anpassung bietet und einen funktionalen Wandel ermöglicht. Zum einen wurde dazu die Modularisierung der Anlagentechnik deutlich weiter vorangetrieben, als dies bislang der Fall war. Zum anderen wurde aber vor allem auch eine umfassende Integrationsfähigkeit der unterschiedlichen Module erreicht. Dazu mussten zunächst die spezifischen Anforderungen von Kunststoffverarbeitungsprozessen herausgearbeitet und maschinenbauliche Lösungen definiert werden. Ziel dieser Forschungsarbeiten war die Erarbeitung eines wandlungsfähigen Fertigungskonzepts für die Kunststoffverarbeitung und die konkrete Übertragung der Lösungsansätze durch den Bau einer Pilotanlage. Das Ergebnis der Vorarbeiten aus der Projektierungsphase ist in Bild 1 dargestellt. Die CAD-Grafik zeigt die modular aufgebaute Pilotanlage, die aus zwei Arbeitsstationen zum Spritzgießen (linker Bereich) und zum Schweißen (rechter Bereich) von Kunststoffbauteilen besteht. Beide Arbeitsstationen bestehen aus mehreren Modulen, die in sich abgeschlossene Funktionseinheiten darstellen. So wurde hier beispielsweise keine konventionelle Spritzgießmaschine verwendet. Stattdessen besteht die Arbeitsstation zum Spritzgießen aus drei komplett voneinander getrennten und autonom zu betreibenden Einheiten, die aufgrund jeweils eigener Bedienpulte, Elektrik- und Hydraulikkreisläufe sowie eigenständiger Steuerungen in zwei Spritzmodule und ein Schließmodul modularisiert wurden. Ebenso wurde bei der Neuentwicklung der Fügestation durch Erzeugen eines Grundmoduls und mehrerer Teilmodule eine konsequente Modularisierung verfolgt. Im späteren Verlauf dieses Beitrags wird auf die entsprechenden Details dieser Umsetzung noch einmal gezielt eingegangen. Alle Module lassen sich bedarfsgerecht zusammenstellen und durch Integration eines 6-Achs-Roboters ist auch eine Automatisierung aller Komponenten möglich. Beide Arbeitsstationen können konventionell betrieben werden, indem sich der Bediener direkt an der Maschine befindet. Die Bedienung findet dann an dem Steuerpult der jeweiligen Anlagenkomponente statt. Es ist aber auch eine verkettete und vollautomatisierte Bedie-



Bild 2: Gesamtanlage mit zentraler Steuerungs- und Bedieneinheit im Vordergrund

nung möglich. Dazu muss sich der Bediener außerhalb des Gefahrenbereichs, hinter einer Kunststoffverschiebung befinden. Die Bedienung der Gesamtanlage findet in diesem Fall nicht über die einzelnen Steuerpulte der Module statt, sondern zentral über ein Bedienpanel, das sich außerhalb der Zelle befindet (Bild 2). Um eine Wandlungsfähigkeit des Gesamtsystems herstellen zu können, ist die Integrationsfähigkeit der einzelnen Module notwendig. Dazu ist die Verwendung klar definierter Hardware- und Softwareschnittstellen erforderlich. Da die Einbindung und das Zusammenspiel der unterschiedlichen Anlagenkomponenten und Technologien in einem Gesamtsystem erreicht werden sollte, stellte die softwaretechnische Integration der Module die größte Herausforderung dar. Dabei sollte den Steuerungen der Teilmodule jedoch die Durchführung des Herstellungsprozesses überlassen werden, da dies den Vorteil hat, dass man auf altbewährte Steuerungs- und Regelalgorithmen des Modulherstellers zurückgreifen kann. Gleichzeitig sollte aber ein Eingriff in die Prozessabläufe möglich sein (anders als bei bekannten Leitstandslösungen), um maximale Anpassbarkeit im System zu erzielen. Zur Realisierung der softwaretechnischen Integration aller Module und deren Funktionen wurde ein Prozesseditor entwickelt, dessen grundsätzliches Prinzip in Bild 3 dargestellt ist. Jedes Modul besitzt aufgrund seiner Konfiguration das Potential bestimmte

are completely separate from each other, because they each had their own operating desks, electrical and hydraulic circuits as well as independent controllers, were modularised into two injection modules and one clamping module. Moreover, consistent modularisation was pursued during the new development of the joining station by producing a basic module and several submodules. In the subsequent course of this article, the corresponding details of this implementation are dealt with in a targeted way once again. All the modules can be arranged according to the needs and all the components can also be automated by integrating a six-axis robot. Both work stations can be operated conventionally with the operator located directly at the machine. The operation then takes place on the control desk of the installation component in question but interlinked and fully automated operation is possible too. For this purpose, the operator must be situated outside the danger area, behind plastic windows. In this case, the entire installation is not operated using the individual control desks of the modules but instead centrally using one operating panel located outside the cell (Fig. 2). In order to be able to make the overall system changeable, it must be possible to integrate the single modules. For this purpose, it is necessary to use clearly defined hardware and software interfaces. Since the incorporation of and interplay between the different installation components and technologies was

to be achieved in one overall system, the integration of the modules using software technology constituted the greatest challenge. In this respect, the execution of the manufacturing process should, however, be left to the controllers of the submodules since this has the advantage that well-proven control and regulation algorithms of the module manufacturer can be called upon. However, it should simultaneously be possible to intervene in the process sequences (unlike in the case of well-known control room solutions) in order to obtain the maximum adaptability in the system. A process editor whose fundamental principle is portrayed on Fig. 3 was developed in order to integrate all the modules and their functions using software technology. Because of its configuration, each module has the potential to carry out certain working processes (functions). The process editor serves as a tool for the modularisation of these processes and permits free combination with each other. For this purpose, all the conceivable working processes of the utilised modules can be defined in individual functional building blocks in the process editor in order to be able to freely combine these in working plans. This happens by pulling a process located in the database (left region on Fig. 3) into the field of the working plan (right region on Fig. 3) by "drag and drop" and linking it with upstream and downstream processes here. In the working plan, only the parameters to be used are then assigned to the processes. This means that a working process can be used several times in one working plan and, in this respect, may have different process parameters in each case. Although the central controller is responsible for processing the working plan after the installation has been started, the execution of the process is ensured by the independent controller of the installation module concerned. Thus, there is no need to intervene in the controller architecture of the module manufacturer. It is merely necessary to clarify the data communication between the central controller and the module controller. One example from the injection moulding field: In the database, the "dosing" process step is defined as a process which is carried out by the "injection unit" module. Within a working plan, this process can be used several times and provided with different

Arbeitsprozesse (Funktionen) auszuführen. Der Prozesseditor dient als Werkzeug zur Modularisierung dieser Prozesse und ermöglicht eine freie Kombination untereinander. Dazu können im Prozesseditor alle denkbaren Arbeitsprozesse der verwendeten Module in einzelnen Funktionsbausteinen definiert werden, um diese in Arbeitsplänen frei kombinieren zu können. Dies geschieht, indem per „Drag-and-Drop“ ein in der Datenbank befindlicher Prozess (linker Bereich in Bild 3) in das Feld des Arbeitsplans (rechter Bereich in Bild 3) gezogen und hier mit vor- und nachgelagerten Prozessen verknüpft wird. Im Arbeitsplan werden den Prozessen dann nur noch die zu benutzenden Parameter zugewiesen. Das bedeutet, dass ein Arbeitsprozess in einem Arbeitsplan mehrmals Verwendung finden und dabei jeweils unterschiedliche Prozessparameter besitzen kann. Die Abarbeitung des Arbeitsplans obliegt nach dem Start der Anlage zwar der Zentralsteuerung, die Durchführung des Prozesses wird aber durch die eigene Steuerung des jeweiligen Anlagenmoduls sichergestellt. Ein Eingriff in die Steuerungsarchitektur des Modulherstellers ist somit nicht nötig. Es muss lediglich die Datenkommunikation zwischen Zentralsteuerung und Modulsteuerung geklärt sein. Ein Beispiel aus dem Spritzgießbereich: Der Prozessschritt „Dosieren“ ist in der Datenbank definiert als Prozess, der vom Modul „Spritzinheit“ durchgeführt wird. Innerhalb eines Arbeitsplans kann dieser Prozess mehrfach verwendet werden und jedes Mal mit anderen Parametern bestückt sein. Das bedeutet, dass innerhalb eines Arbeitsgangs die Möglichkeit besteht, mit einem Aggregat mehrfach Kunststoffschmelze aufzudosieren, aber das Plastifizierungsvolumen dabei jeweils unterschiedlich sein kann. Nach dem Starten eines Auftrags zur Abarbeitung eines Arbeitsplans, werden die einzelnen Prozesse sequentiell initiiert, indem die Zentralsteuerung ein Datenpaket mit Prozessparametern an die Modulsteuerung schickt und nach Abarbeitung des Vorgangs meldet das Modul die Ist-Prozessdaten an die Zentralsteuerung zurück, die die Daten in einer Datenbank für jeden hergestellten Artikel ablegt. Soll die Datenbank um weitere Funktionen ergänzt werden, um die Anlage zu erweitern, ist dies mit nur wenigen Mausklicks problemlos möglich. Ebenso ist es möglich zur Herstel-

lung eines Artikels verschiedene Arbeitspläne in der Datenbank zu hinterlegen, die beim Start eines Auftrags gezielt ausgewählt werden können. Beispielsweise könnte ein Artikel aus zwei zusammengesetzten Fügepartnern bestehen. Dies könnte auf verschiedene Weise geschehen. Bei einem Arbeitsplan werden die Teile zum Beispiel direkt aus der Spritzgießstation entnommen und spritzwarm verschweißt, in einem anderen Arbeitsplan nimmt der Roboter die Teile von einem Lagerplatz, setzt sie in die Aufnahmen der Schweißmaschine ein und verschweißt sie zu einem fertigen Artikel. Äußerlich sind die Teile dann zwar scheinbar gleich, wurden aber auf unterschiedliche Weise hergestellt. Mit dieser Steuerungsarchitektur ist also nicht nur eine modulübergreifende Integration möglich, es besteht auch die Möglichkeit immer neue Prozessketten (Arbeitspläne) anzulegen und die Datenbanken um neue Artikel und Prozesse zu erweitern. Selbst eine auftragsbezogene Fertigung ist möglich, da nicht nur die Stückzahlen, sondern auch die Artikelvarianz beliebig anpassbar ist.

3. Konkrete Umsetzung der Wandlungsfähigkeit anhand der Fügestation

Bei der neu entwickelten Fügestation handelt es sich mit dem Zirkularschweißverfahren der Firma Fischer Schweißtechnik verfahrenstechnisch um ein etabliertes unidirektionales Reibschweißverfahren, wobei hier die zur Erwärmung notwendige Kreisbewegung mittels Spindelsystem erzeugt wird und somit eine exakte zweidimensionale Kreisbahn eingehalten werden kann. Aufgrund der verwendeten Servoantriebstechnik ist bei dieser Maschine die

parameters every time. This means that, within one operation, there is the possibility of dosing plastic melt several times with one unit but the plastification volume may be different in each case while doing so. After an order to process a working plan has been started, the individual processes are initiated sequentially when the central controller sends a data package with process parameters to the module controller and, after the operation has been processed, the module feeds the actual process data back to the central controller which saves the data in a database for every manufactured article. If the database is to be supplemented by further functions in order to extend the installation, it is no problem to do this with just a few clicks of the mouse. For the manufacture of an article, it is also possible to store in the database various working plans which can be selected in a targeted way when an order is started. For example, an article could consist of two joining members welded together. This could happen in various ways. In the case of one working plan, the parts are, for example, removed directly from the injection moulding station and are welded when they are warm from injection. In another working plan, the robot takes the parts from a storage site, inserts them into the holders of the welding machine and welds them into a finished article. Although the parts are then apparently identical superficially, they were manufactured in different ways. Therefore, this controller architecture permits not only integration extending across the modules but also the creation of ever new process chains (working plans) and the extension of the databases with new articles and processes. Even

order-related fabrication is possible since not only the quantities but also the article variance are adaptable in any way. 3. Concrete implementation of changeability using the example of the joining station As far as process technology is concerned, the newly developed joining station with the circular welding process from Fischer Schweißtechnik constitutes an established unidirectional friction welding process. In this respect, the circular movement necessary for the heating is produced here using a spindle system and an exact two-dimensional circular path can be complied with in this way. Because of the utilised servo drive technology, the welding frequency of this machine is freely programmable in a range of 0 - 160 Hz. This configuration is sufficient in order to reach striven-for welding speeds of approx. 500 mm/s and thus to obtain good melt formation. At a maximum welding force of 5,000 N, a joining area of max. 50 cm² can be welded in a reliable process in the case of polypropylene and a required welding pressure of approx. 1 N/mm². The size of the head plate in order to accommodate the welding tool is 160 x 250 mm. A part size of approx. 100 x 150 mm can be put into effect in this respect. From the viewpoint of process technology, this does not represent a new development. Accordingly, the work within the framework of this project relating to changeability did not focus on welding investigations either. The consistent modularisation of the installation technology as well as the integration of the changeable fabrication installation set up on the basis of process technology modules were regarded as essential objectives. For the welding installation, the aim was consequently to design a machine concept of such a type that the above change enablers are fulfilled to the greatest possible extent. In this case as well, the modularity constituted the most important change enabler. As Fig. 4 shows, all the machine components were modularised to the greatest possible degree. The machine is set up on a basic module which consists of a working table and a vertical cross-beam. In this respect, the sizes of both modules can be scaled depending on the application. A servo motor is attached to this in order to drive the recirculating ball screw for quick travelling movements,

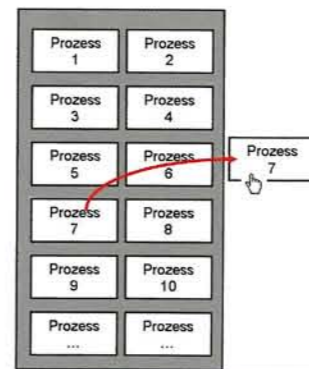


Bild 3: Prinzipialskizze für den Prozesseditor mit Datenbank und Arbeitsplan

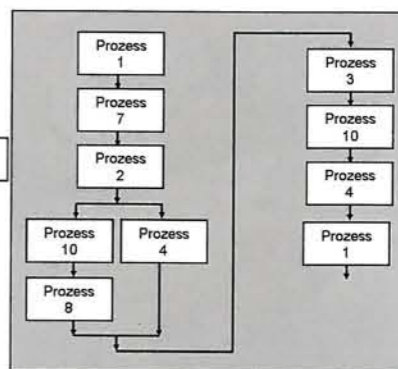


Fig. 3: Principle sketch for the process editor with a database and a working plan

Schweißfrequenz in einem Bereich von 0 bis 160 Hz frei programmierbar. Diese Konfiguration ist ausreichend um angestrebte Schweißgeschwindigkeiten von etwa 500 mm/s zu erreichen, um so eine gute Schmelzbildung zu erzielen. Mit einer maximalen Schweißkraft von 5000 N kann bei Polypropylen und einem erforderlichen Schweißdruck von etwa 1 N/mm<sup>2</sup> eine Fügefläche von maximal 50 cm<sup>2</sup> prozesssicher verschweißt werden. Die Größe der Kopfplatte zur Aufnahme des Schweißwerkzeugs beträgt 160 x 250 mm, wodurch eine Teilegröße von etwa 100 x 150 mm realisierbar ist. Es handelt sich verfahrenstechnisch betrachtet hierbei um keine Neuentwicklung. Im Rahmen dieses Projekts zur Wandlungsfähigkeit standen dementsprechend auch nicht Schweißuntersuchungen im Fokus der Arbeiten. Als wesentliches Ziel galten die konsequente Modularisierung der Anlagentechnik sowie die Integration der auf Basis von verfahrenstechnischen Modulen aufgebauten wandlungsfähigen Fertigungsanlage. Für die Schweißanlage galt es folglich ein Maschinenkonzept derart zu entwerfen, dass die oben genannten Wandlungsbefähiger weitestgehend erfüllt werden. Dabei stellte die Modularität auch in diesem Fall den wichtigsten Wandlungsbefähiger dar. Wie Bild 4 zeigt, wurden alle Maschinenkomponenten weitestgehend modularisiert. Die Maschine ist auf einem Grundmodul aufgebaut, das aus einem Arbeitstisch und einer senkrechten Traverse besteht, wobei beide Module je nach Anwendung größenmäßig skalierbar sind. Daran angebaut befinden sich ein Servomotor, um die Kugelumlaufspindel für schnelle Verfahrbewegungen anzutreiben, sowie ein Kurzhubzylinder zum Aufbringen des eigentlichen Schweißhubs. Ebenfalls befinden sich am Grundmodul zwei definierte mechanische Schnittstellen. Die mechanische Schnittstelle am Arbeitstisch macht einen schnellen (und bei Bedarf automatisierten) Werkzeugwechsel möglich. Schnittstelle 2 an der senkrechten Traverse macht einen Austausch der gesamten Schweißtechnologie möglich. Der Schweißkopf, samt zugehörigem Schweißantrieb ist mittels Nullpunkt-Spannsystem mit der Traverse verbunden und kann händisch und/oder vollautomatisiert mittels Roboter entnommen werden (siehe Bild 5).

In Bild 5 wurde der Schweißkopf bereits aus dem Grundmodul gelöst und kann vom Roboter nun auf einem Wechselbahnhof abgelegt werden. Diese Anwendung zeigt, dass der modulare Aufbau der Fügestation auch dem Anwender erhebliche Vorteile bietet. Dadurch, dass auch ein händischer Wechsel problemlos möglich ist, wird der Anwender dazu ermächtigt, sein Fertigungssystem bedarfsgerecht anzupassen. Der hier gewählte Grad an Modularisierung ermöglicht eine wandelbare Anlagentechnik, wobei in diesem Fall die Modularisierung sowohl aus Herstellersicht, als auch aus Anwendersicht zutreffend ist. Dem Hersteller ermöglicht sie

as is a short-stroke cylinder for the application of the actual welding stroke. Two defined mechanical interfaces are also located on the basic module. The mechanical interface on the working table makes it possible to change the tool quickly (and, if necessary, in an automated process). Interface 2 on the vertical cross-beam makes it possible to replace the entire welding technology. The welding head, together with the relevant welding drive, is connected with the cross-beam using a zero-point clamping system and can be removed manually and/or in a fully automated method using a robot (see Fig. 5). On Fig. 5, the welding head has already been detached from the basic module

and can then be deposited on a changing station by the robot. This application shows that the modular structure of the joining station offers considerable advantages to the user as well. Because it is also no problem to make a manual change, the user is authorised to adapt his fabrication system according to the needs. The degree of modularisation chosen here permits changeable installation technology. In this case, the modularisation is appropriate from the viewpoint not only of the manufacturer but also of the user. It allows the manufacturer to simplify his internal product development process but it also offers the user the possibility of adaptation according to the needs with a comparatively small scope of work. This results in a win-win situation for the manufacturer and the user alike.

**4. Evaluation of the changeable installation concept**

The overall installation set up at IfW constitutes a pilot installation which, in this form, does not yet have the status of an installation which is ready for series production and marketable. Moreover, this was not the objective of this research project (promoted as a large DFG device). However, the installation represents a basis for advanced research and development work in order to come closer to the ideal type of a changeable installation. In the field of machine tool technology, the subject of changeability has already progressed by a few steps. Because there are a lot of plastic-specific questions, it must still firstly be clarified how much and at what position changeability is actually needed in plastics processing, how high a sensible degree of changeability is and where faith must be placed in flexible systems instead. However, the far-reaching findings from the planning, construction and commissioning of the pilot installation as well as a very positive response from discussions with experts have already shown that this new production concept offers enormous potential for plastics processing. A changeable production system for plastics processing should be imagined as a "building block system" from which the ultimate user picks out individual modules in relation to the requirements and independently integrates these into

seinen internen Produktentstehungsprozess zu vereinfachen, dem Anwender bietet sie aber darüber hinaus die Möglichkeit einer bedarfsgerechten Anpassung bei vergleichsweise geringem Aufwand, wodurch sich für Hersteller und Anwender gleichermaßen eine Win-Win-Situation ergibt.

**4. Beurteilung des wandlungsfähigen Anlagenkonzepts**

Bei der am IfW aufgebauten Gesamtanlage handelt es sich um eine Pilotanlage, die in dieser Form noch nicht den Status einer serienreifen und marktfähigen Anlage besitzt. Dies war auch nicht das Ziel des Forschungsvorhabens (gefördert als DFG-Großgerät). Die Anlage stellt aber eine Basis für weitergehende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dar, um dem Idealtypus einer wandlungsfähigen Anlage näher zu kommen. Im Bereich der Werkzeugmaschinenentechnik ist das Thema Wandlungsfähigkeit bereits fortgeschritten. Aufgrund der vielen kunststoffspezifischen Fragestellungen muss erst noch geklärt werden, wie viel und an welcher Stelle Wandlungsfähigkeit in der Kunststoffverarbeitung tatsächlich benötigt wird, wie hoch ein sinnvolles Maß an Wandlungsfähigkeit ist und wo eher auf flexible Systeme gesetzt werden muss. Die weit reichenden Erkenntnisse aus der Projektierung, dem Bau und der Inbetriebnahme der Pilotanlage sowie eine sehr positive Resonanz aus Expertengesprächen haben bereits gezeigt, dass dieses für die Kunststoffverarbeitung neue Produktionskonzept enormes Potenzial bietet.

Ein wandlungsfähiges Produktionssystem für die Kunststoffverarbeitung sollte man sich wie ein Baukastensystem vorstellen, aus dem der Endanwender anforderungsbezogen einzelne Module herausgreift und diese in bestehende Strukturen selbstständig integriert. Anhand der modular aufgebauten Fügestation wurde dieses Konzept bereits weitgehend umgesetzt, da hier das bestehende Grundmodul je nach Bedarf beispielsweise um weitere Technologien ergänzt werden kann. Ein Großteil des bestehenden Systems kann weiterhin

genutzt werden. Dies hat für den Anwender deutliche Kostenvorteile, da nicht alle Investitionskosten von Anfang an anfallen, sondern erst dann, wenn zusätzliche Technologien ergänzt werden, was eine geringere Kapitalbindung zur Folge hat. Außerdem ist der Erwerb ergänzender Technologien (zusätzlicher Schweißköpfe) deutlich günstiger, als der Erwerb einer kompletten zusätzlichen Schweißmaschine, da das Grundmodul Wiederverwendung findet. Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn es sich um Kleinserien, Abmusterungen oder Aufträge mit hoher Artikelvarianz handelt.

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass mit einer konsequenten Modularisierung der Maschinen- und Anlagentechnik und der Definition eindeutiger mechanischer, elektrischer und informationstechnischer Schnittstellen die Möglichkeit besteht Fertigungsmodule aus einem Modulbaukasten auftragsbezogen zu kombinieren, um somit schnell und zuverlässig sowohl auf externe (beispielsweise sich verändernde Marktbedingungen) wie auch auf interne Impulse (zum Beispiel Notwendigkeit einer Technologieerweiterung durch Ausweitung des Produktportfolios) reagieren zu können. Nur durch die Schaffung von in sich geschlossenen standardisierten Modulen mit nach außen klar definierten Schnittstellen ist eine schnelle und einfache Anpassung des Systems möglich. Dieses Forschungsprojekt hat gezeigt, dass dies grundsätzlich möglich ist und alle im Projekt involvierten Partner waren auch bereit diesen bislang noch eher unüblichen Weg mitzugehen.

**Danksagung**

Planung, Projektierung und Bau der wandlungsfähigen Pilotanlage wurde in enger Zusammenarbeit mit Firma Phoenix Contact GmbH & Co. KG in Blomberg realisiert. Die Neuentwicklung der modularen Schweißmaschine entstand auf Basis von Vorgaben des IfW bei der Firma Fischer Kunststoff-Schweißtechnik GmbH in Berkatal. Wir danken den Unternehmen und allen beteiligten Mitarbeitern für ihre großartige Unterstützung.

existing structures. On the basis of the joining station with a modular structure, this concept has already been implemented to a great extent since, depending on the needs, the existing basic module can be supplemented here (for example) by further technologies. A large proportion of the existing system can still be used. This has substantial cost-related advantages for the user since not all the investment costs are incurred from the start but instead only when additional technologies are added. This leads to less tied-up capital. Moreover, it is considerably more favourable to purchase supplementary technologies (additional welding heads) than a complete extra welding machine because the basic module is re-used. This makes sense particularly whenever it is a question of small series, specimens or orders with high article variance. In principle, it may be stated that, with the consistent modularisation of the machine and installation technology and with the definition of unambiguous mechanical, electrical and information technology interfaces, it is possible to combine fabrication modules from one

modular building block in relation to the order so that there can be a rapid and reliable reaction to external stimuli (e.g. changing market conditions) as well as to internal stimuli (e.g. necessity of a technological extension by widening the product portfolio). The quick and simple adaptation of the system is only possible by creating self-contained standardised modules with interfaces clearly defined to the outside. This research project has shown that this is possible in principle and all the partners involved in the project were also willing to tread this path which has still been rather unusual until now.

**Expression of thanks**

The changeable pilot installation was planned, designed and constructed in close cooperation with Phoenix Contact GmbH & Co. KG in Blomberg. The new development of the modular welding machine was created at Fischer Kunststoff-Schweißtechnik GmbH in Berkatal on the basis of stipulations made by IfW. We thank the companies and all the participating employees for their tremendous support.

**Literatur References**

- [1] Kinkel, S.; Kleine, O.; Maloca, S.: Wandlungsfähigkeit der deutschen Industrie – Potenziale, Befähiger und Benchmarking. Modernisierung der Produktion – Mitteilungen aus der ISI-Erhebung, Karlsruhe, 2012.
- [2] Nyhuis, P.; Heinen, T.; Reinhart, G.; Rimpau, C.; Abele, E.; Wörn, A.: Wandlungsfähige Produktionssysteme: Theoretischer Hintergrund zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. wt Werkstatttechnik online 98, 2008.
- [3] Reinhart, G.; Berlak, J.; Effert, C.; Selke, C.: Wandlungsfähige Fabrikgestaltung. ZWF 97, 2002.
- [4] Heger, C. L.: Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. Berichte aus dem IFA 01/2007, Garbsen: PZH 2007, Dissertation Universität Hannover, 2007.
- [5] Wiendahl, H.-P.; Nofen, D.; Klußmann, J.-H.; Breitenbach, F.: Planung modularer Fabriken – Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. Hanser Verlag, München, 2005.
- [6] Nyhuis, P.; Reinhart, G.; Abele, E.: Wandlungsfähige Produktionssysteme – Heute die Industrie von morgen gestalten. PZH Produktionstechnisches Zentrum, Hannover, 2008.
- [7] Hernández Morales, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Dissertation, Universität Hannover. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 16 Nr. 149. VDI Verlag, Düsseldorf, 2003.
- [8] Kreimeier, D.; Velkova, J.; Schröder, S.: Modularisierung von Produktionssystemen. Productivity Management, Ausgabe 3-2011.
- [9] Wiendahl, H.-P.; Nofen, D.; Klußmann, J.-H.; Breitenbach, F.: Planung modularer Fabriken - Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. Hanser Verlag, München, 2005.

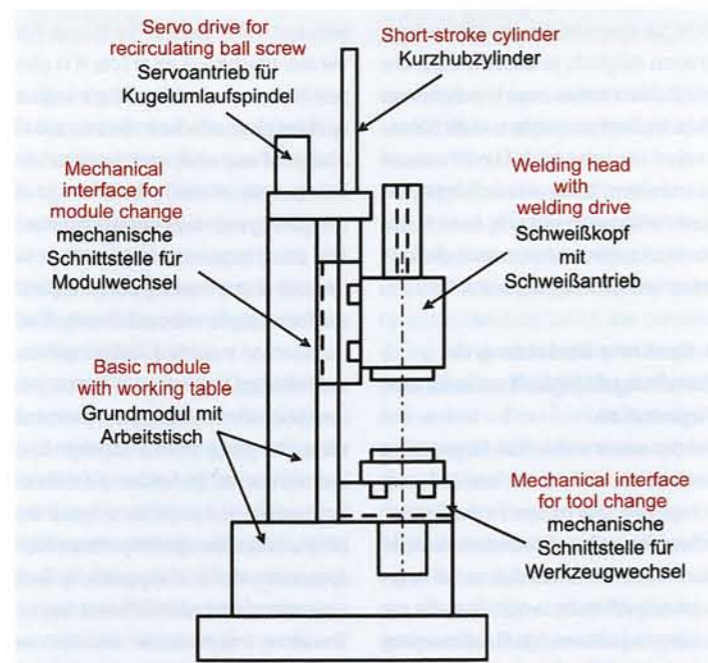


Bild 4: Skizze der modular aufgebauten Schweißmaschine

Fig. 4: Sketch of the welding machine with a modular structure



Bild 5: Automatisierter Schweißkopfwechsel

Fig. 5: Automated welding head change