

# Akustische Fügeprozeßüberwachung bei Geruchverschlüssen

Th. Löffler, M. Kuny, H. Fastl\*

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, \*Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, TU-München

## Einführung

Bei vielen manuellen oder teilautomatisierten Montagevorgängen findet die Qualitätssicherung durch einen Mitarbeiter statt. Er fühlt, sieht oder hört, ob der Prozeß korrekt verläuft. Oft ergeben sich Unterschiede in den Geräuschen von fehlerfreien und fehlerhaften Prozessen. Fehler können somit akustisch erkannt werden. Eine akustische Qualitätsbeurteilung durch den Menschen setzt voraus, daß der Mitarbeiter die gute- und fehlerspezifischen Geräuscheigenschaften zu unterscheiden gelernt hat. Fällt ein erfahrener Mitarbeiter aus, muß ein neuer Mitarbeiter erst den Lernprozeß zur Unterscheidung der Geräuschemerkmale durchlaufen. Für die Zuverlässigkeit seines Urteils spielen Gesichtspunkte wie seine Aufmerksamkeit und Konzentration, die Art und Anzahl der vorher gehörten Geräusche sowie seine gesamte subjektive Einstellung eine entscheidende Rolle. Die Beurteilungsmaßstäbe können daher bei jedem Einzelprodukt anders sein. Die subjektive Beurteilung ist deshalb im allgemeinen zu ungenau oder fehlerhaft. Daher ist der Einsatz von objektiven Prüf- und Überwachungsverfahren wünschenswert.

Am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der TU-München wurde ein Versuchsstand zur Montage von Geruchverschlüssen aufgebaut, an dem der Fügeprozeß akustisch überwacht werden kann. Ein Geruchverschluss ist ein hydraulischer Abschlußkörper, der zwischen dem Ablaufventil und der Abwasserleitung eingebaut wird. Er verhindert das Austreten von Gasen aus der Abwasserleitung in Wohnräume, ohne die Funktion des Entwässerungsgegenstandes zu behindern. Der verwendete u-förmige Geruchverschluss besteht aus drei Bauteilen, Krümmer, Bogen und Abflußstutzen, die aus weißem Polypropylen hergestellt werden (Bild 1).

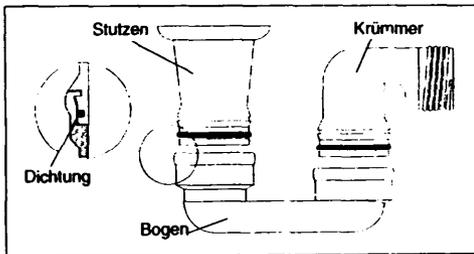


Bild 1: Fügeobjekt Geruchverschluss

Die Einzelteile werden durch zwei gleichartige, nichtlösbare Ringschnappverbindungen am Krümmer und am Stutzen gefügt. Um die Dichtheit der Fügestellen zu gewährleisten ist jeweils ein O-Ring in eine Nut am Krümmer und am Stutzen eingelegt. Zur Montage werden Krümmer und Stutzen im Bereich des Schnappsitzes mit Silikonfett versehen, in eine Montageform eingelegt und durch Formschluß fixiert. Der Bogen wird vor dem Fügen auf ca. 60° C erwärmt, auf die Fügepartner aufgelegt und durch einen Pneumatikzylinder aufgepreßt. Bei der Montage kann es vorkommen, daß der O-Ring während des Fügens teilweise aus der Nut gezogen wird und zwischen den Wandungen des Schnappsitzes gequetscht wird. Der Geruchverschluss ist in diesem Fall nicht ordt und muß aussortiert werden. Bei der manuellen Montage der Geruchverschlüsse beurteilte das Bedienpersonal das Auftreten von Fehlern anhand der Prozeßgeräusche. Ziel war es diese subjektive akustische Qualitätsbeurteilung für eine automatisierte Fügestation durch eine meßtechnische Prüfung zu ersetzen. Die Geräusche von Fügeprozessen werden durch Reibprozesse beim Fügen sowie durch das Rückfedern der Schnappverbindungen erzeugt. Sie sind charakteristisch für

den Prozeßverlauf. Die lokal angeregten Schwingungen breiten sich als Körperschall in den Fügeobjekten aus und werden an Berührungspunkten auf Fügewerkzeuge und Haltevorrichtungen übertragen sowie von der Oberfläche als Luftschall abgestrahlt. Der Vorteil der akustischen Überwachung gegenüber der herkömmlichen Kraftüberwachung, bei der die Kraft in Fügenrichtung im Stempel erfaßt wird, liegt in der indirekten Erfassung von Kräften an den Schnappelementen, die nicht in Fügenrichtung wirken. Gerade diese Kräfte stellen jedoch die Ursache für die typischen Fügegeräusche dar.

## Messungen

Zur akustischen Überwachung bietet sich zunächst die Messung der Luftschallemissionen an. Dazu wurde ein Kondensatormikrofon mit nahezu frequenzunabhängigen Übertragungsmaß zwischen 20 Hz und 20 kHz verwendet. In einer Fabrikumgebung tritt allgemein eine Vielzahl von Nebengeräuschen auf, die das interessierende Prozeßgeräusch überdecken können. Eine Schallkapselung der zu überprüfenden Fügeeinrichtung ist oft nur schwer oder überhaupt nicht möglich. Insbesondere ist die Akzeptanz einer solchen Maßnahme bei den Anlagenbetreibern aufgrund der eingeschränkten Zugänglichkeit der Fügeeinrichtung in der Regel gering. Alternativ zur Luftschallmessung bietet sich die Messung von Körperschall an. Eine direkte Montage von Körperschallaufnehmern an den Fügeobjekten ist nicht praktikabel, da die Aufnehmer vor dem Fügeprozeß am Fügeobjekt befestigt und im Anschluß daran wieder entfernt werden müßten. Der zeitliche Aufwand steht im Gegensatz zu den Bestrebungen die Durchlaufzeiten in der Produktion zu reduzieren. Zusätzlich müßten am Fügeobjekt entsprechende Möglichkeiten zur Befestigung der Aufnehmer vorgesehen werden. Als Alternative bietet sich eine Befestigung am Montagewerkzeug oder an der Haltevorrichtung (z.B. Montageform) an. Am Versuchsstand wurde ein Beschleunigungsaufnehmer am Fügegestempel des Pneumatikzylinders befestigt. Ein an der Montageform befestigter Beschleunigungsaufnehmer wurde aufgrund starker Eigenschwingungen des Versuchsbaus wieder entfernt. Mit berührungslosen Verfahren kann die Schwingung im allgemeinen direkt an ihrem Entstehungsort erfaßt werden. Als berührungsloses Schwingungsmesssystem wurde am Versuchsstand ein nach dem Doppler-Effekt arbeitendes Laservibrometer eingesetzt. Da die Bewegungen der Objektsoberfläche, die aus der Fügebewegung und der Deformation des Fügeobjektes unter Kräfteinfluß resultierten, bedeutend größer sind als die Körperschallschwingungen, eignen sich nur Oberflächen von Fügeteilen, die nicht durch den Fügevorgang bewegt werden. Im bestehenden Fall sind dies die Fügeteile in der Montageform. Der Meßpunkt wurde am Stutzen des Geruchverschlusses gewählt. Eine optimale Auswahl des Meßortes sowohl für berührende, als auch berührungslose Schwingungsmessung erfordert aufwendige Versuche oder entsprechende Erfahrung.

Neben dem Auftreten von Fügefehlern sind auch von Prozeßparameterschwankungen Einflüsse auf den Prozeßverlauf und damit auf die Prozeßgeräusche zu erwarten. Wird der Einfluß von Prozeßparametern nicht berücksichtigt, kann es zu einer fehlerhaften Qualitätsbeurteilung kommen. Bei der Montage der Geruchverschlüsse sind solche Prozeßparameter der Druck im Pneumatikzylinder, die aufgebrauchte Schmiermittelmenge im Bereich des Schnappsitzes und die Vorwärmtemperatur der Bogen. Um diese Einflüsse systematisch untersuchen zu können, wurde ein vollfaktorierter Versuchsplan aufgestellt. Dabei werden die Prozeßparameter auf zwei unterschiedlichen Niveaus variiert. Zweckmäßigerweise werden als Versuchsstufen die

Grenzwerte der im Betrieb auftretenden Parameterschwankungen gewählt. Durch den vollfaktoriellen Versuch können neben den Auswirkungen einzelner Parameter auch deren Wechselwirkungen auf das Prozeßgeräusch ermittelt werden. Da das Auftreten von Fehlern in der Geruchverschlußmontage mit einer Fehlerrate von 0,25 % als stochastisch-bedingt angesehen werden kann, mußten Montagefehler simuliert werden. Das gezielte Erzeugen von Fehlern wurde als weiterer „Parameter“ in den Versuchsplan aufgenommen.

Um die Signalverläufe verschiedener Versuche miteinander vergleichen zu können, sind charakteristische Merkmale der Signale festzulegen. Diese Merkmale können sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich liegen. Um möglichst genaue Aussagen über einen Prozeß treffen zu können, sollten die verwendeten Merkmale unter gleichen Versuchsbedingungen nur kleinen Streuungen unterliegen.

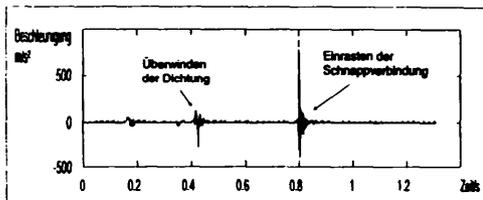


Bild 2: Körperschallsignal

In allen drei Prozeßsignalen, Luftschall-, Körperschall- und Vibrometersignal, ist der Prozeßablauf deutlich zu erkennen (Bild 2). Geräusche treten speziell beim Überwinden der Dichtung und beim Einrasten der Schnappverbindung auf. Als Zeitbereichsmerkmale wurden die Betragsmaxima beim Überwinden der Dichtung und beim Einrasten der Schnappverbindung sowie der Gleichrichtwert über die gesamte Meßzeit verwendet. Die Spektraluntersuchung der Geräusche wurde in Anlehnung an die übliche Terzanalyse durchgeführt. Dazu wurden mittels Fast-Fourier-Transformation die Spektren der Geräusche beim Überwinden der Dichtung und beim Einrasten der Schnappverbindung berechnet. Zuvor wurde das Zeitsignal symmetrisch zur Lage des jeweiligen Betragsmaximums mit einem Hanning-Fenster mit einer Länge von 16384 Abtastwerten bewertet. Die gewählte Fensterlänge ergibt sich aus der größten Zweierpotenz von Abtastwerten, bei der keine Überlappung des Geräusches beim Überwinden der Dichtung mit dem Fensterbereich beim Einrasten und umgekehrt auftritt. Das Spektrum wurde anschließend in 31 Bereiche zwischen 14 Hz und 22390 Hz aufgeteilt, deren Grenzen den Grenzfrequenzen der Terzfilter für elektroakustische Messungen gemäß DIN 45 652 entsprechen. Abschließend wurden die Spektralwerte innerhalb der Grenzen aufsummiert. Auf diese Weise erhält man 31 Merkmale, die der spektralen Verteilung der Geräusche entsprechen.

### Ergebnisse

Bei vielen Merkmalen zeigte sich ein gemeinsamer Einfluß von Fehlern und der Vorwärmtemperatur des Bogens. Temperaturänderungen können somit Fehler in der Qualitätsbeurteilung verursachen. Ist die Vorwärmtemperatur bekannt, kann der in Versuchen ermittelte Temperatureinfluß rechnerisch kompensiert werden. Abweichungen des temperaturkompensierten Merkmals von seinem Sollwert sind dann auf den Fehlerfall zurückzuführen. Als nachteilig erweist sich der zusätzliche Aufwand für die Temperaturmessung. Weist ein Merkmal einen starken Fehlereinfluß auf, ist es voraussichtlich für die Erkennung des Fehlers geeignet. Zur Unterscheidung von fehlerfreiem und fehlerhaftem Fall wird eine Schwelle gewählt deren Über- oder Unterschreiten zur Zuordnung zu einer Qualitätsstufe genutzt wird.

Bei der Qualitätsbeurteilung können Fehler auftreten. Dabei ist zwischen kritischen und unkritischen Fehlern zu

unterscheiden. Als kritischer Fehler wird die Klassifikation eines fehlerhaften Teils als „Gutteil“ bezeichnet. Das fehlerhafte Teil wird somit nicht als solches erkannt und an den Kunden geliefert. Ein unkritischer Fehler dagegen ist die Klassifikation eines Gutteils als „Fehler“. Die Kosten für kritische Fehler sind im allgemeinen um ein Vielfaches höher als für unkritische Fehler. Die Entscheidungsgrenzen für die Versuchsauswertung wurden so gelegt, daß keine kritischen Fehler auftraten. Mit den so ermittelten Entscheidungsgrenzen wurde die Erkennungsrate für jedes Merkmal über alle Versuche ermittelt. Die Erkennungsrate gibt das Verhältnis richtig-erkannter Versuche zur Gesamtzahl der Versuche an. Die Erkennungsrate ist somit ein Maß für die Eignung bestimmter Merkmale oder eines Verfahrens.

In den Versuchen ergaben sich deutliche Unterschiede für die Erkennungsleistung von Fügefehlern am Stutzen und am Krümmer. Dies läßt sich durch die Wahl der Meßorte erklären. Bei der Luftschallmessung konnte das Mikrofon nicht in gleicher Entfernung von Stutzen und Krümmer positioniert werden, da es sonst die Zu- und Abführung der Bauteile behindert hätte. In der für die Versuche verwendeten Position treffen die Schallwellen des Schnappvorgangs am Krümmer direkt, die des Schnappvorgangs am Stutzen nur indirekt auf das Mikrofon. Ähnliches gilt für die Körperschallmessung mit dem Beschleunigungsaufnehmer. Anders verhält es sich mit den Messungen des Laservibrometers. Der Meßort liegt hier am Stutzen. Die Erkennungsrate für Stutzenfehler ist dementsprechend höher.

Die besten Ergebnisse ergaben sich für die Luftschallmessung mit einer Erkennungsrate von 90% für Krümmerfehler. Die Körperschallmessung ergab eine maximale Erkennungsrate von 82% für Krümmerfehler. Am schlechtesten schnitt die Vibrometermessung ab. Hier wurde für Stutzenfehler eine maximale Erkennungsrate von nur 71% erreicht.

Meßgröße	Schalldruck	Beschleunig.	Geschwindigkeit.
Merkmal	Dichtung	Dichtung	Dichtung
Frequenz	25 Hz	160 Hz	63 Hz
Fehler	Stutzen	Stutzen	Stutzen
Erk.rate	57%	60%	71%
Temp.komp.	ja	ja	ja

Meßgröße	Schalldruck	Beschleunig.	Geschwindigkeit.
Merkmal	Dichtung	Einrasten	Dichtung
Frequenz	250 Hz	6.3 kHz	400 Hz
Fehler	Krümmer	Krümmer	Krümmer
Erk.rate	90%	82%	66%
Temp.komp.	ja	nein	nein

Tabelle 1: Maximale Erkennungsraten

Bei dem untersuchten Prozeß erweist es sich als nachteilig, daß die beiden Schnappvorgänge an Stutzen und Krümmer nahezu gleichzeitig erfolgen und daher durch die akustische Messung nicht getrennt erfaßt werden können. Bezeichnend dagegen ist, daß die maximalen Erkennungsrate beim Überwinden der Dichtung erreicht werden. Dies ermöglicht eine frühzeitige Fehlererkennung, so daß der fehlerhafte Fügeprozeß unterbrochen und nach einer Korrektur zu Ende geführt werden könnte. Durch eine Optimierung der Meßorte der akustischen Aufnahme ist eine Verbesserung der Erkennungsleistung zu erwarten.

Allgemein gesehen stellt die akustische Qualitätsprüfung eine erstzunehmende Alternative zu herkömmlichen Methoden der prozeßbegleitenden Qualitätsprüfung von Fügeprozessen dar.