

Möglichkeiten einer Fehlerauskunftsmessung in einer automatisierten Fertigung

Prof. dr.sc. **Franjo Jović**, Universität Osijek, Dr.sc. **Alan Jović**,
Universität Zagreb, Dipl.-Ing. **Darko Krmpotić**, KIO Keramika, Orahovica,
Kroatien

Zusammenfassung

Die Verantwortung für Fehler in einer automatisierten Fertigung liegt in der Regel beim Überwachungspersonal. Eine Produktion, in der Soll-Daten vollständig mit den Ist-Ergebnissen übereinstimmen, ist nicht zu erlangen. Trotz der inhärent kleinen Unterschiede von Zielspezifikationen an automatisierten Maschinen bestimmen intrinsisch komplizierte und verkettete Einflüsse das Fertigungsergebnis. Fehlerschätzungen basieren deswegen nur auf Prozessinformationen. Eine vereinfachte eindimensionale (1D) signalbasierte Carnap'sche Auskunftsmessung der Prozesssignale wird vorgeschlagen. Die Vergleichsanalyse der Shannon'schen und Carnap'schen Auskunftsmessungen wird dargestellt und auf einer zweistufigen automatisierten Laboranlage erprobt. Es wird festgestellt, dass von 30 Messpunkten die Shannon'sche Auskunftsmessung in 15% der Fälle fehlerhaft, dass die Carnap'sche 2D-Auskunftsmessung in 10% der Fälle zu zeitaufwendig, und dass die Carnap'sche 1D-Auskunftsmessung annehmbar für dynamische Beschreibung von Produktionsfehlern ist.

Schlüsselworte: automatisierte Fehlerdiagnose, Carnap'sche 1D-Auskunftsmessung, Shannon-Auskunftsmessung.

1 Einleitung

Ziel aller Fertigungsprozesse ist es, ein Produkt herzustellen, dessen Ist-Daten mit den Soll- oder Zieldaten übereinstimmen. Die Zieldaten ergeben sich aus den Produkthanforderungen. Aus diesem Grund müssen die Ergebnisse einer Fertigung überwacht werden, um die Produkthanforderungen sicher zu stellen.

Abweichungen der Produkt-Ist-Daten von den Soll-Daten entstehen auf zwei Wegen. Zum einen sind es die Abweichungen von Zielspezifikationen und zum anderen zu große Toleranzen um diese Zielspezifikationen. Der Fertigungsprozess bedarf also einer kontinuierlichen Fertigungskontrolle (FK) zum Abschätzen und Verbessern der so genannten Produktqualität, unter der man eine hohe, tolerierte Übereinstimmung von Zieldaten und Ist-Daten versteht. Die Fertigungs- (FK) oder

Qualitätskontrolle (QK) wird immer mit Hilfe von manuellen Messungen und Nachbesserungen vorgenommen [1], die von Menschen durchgeführt werden.

Bei großen Stückzahlen behilft man sich mit kontinuierlich entnommenen Stichproben und deren Analyse hinsichtlich der Nähe zur Zielspezifikation. Darauf basieren verschiedene Prozeduren, die auf dem Grund der Produktzyklusführung in großen Firmen etabliert sind [2]. Bei solchen Fertigungs- oder Produktionsprozessen, die aus einzelnen miteinander verketteten Fertigungsschritten bestehen, kann man allerdings nur schwer aus den Abweichungen am Endprodukt auf die Ursache der jeweiligen Abweichung zurückschließen. Dies funktioniert teilweise dann, wenn bei der Maschinenbedienung routiniertes Personal zum Beobachten und Einstellen der Produktionsvariablen eingesetzt wird, das mit der Produktionsmaschine und dem Fertigungsprozess vertraut ist. Dabei sind zusätzliche Prozessmessungen hilfreich, aus denen das Personal Zwischeninformationen über den Prozess gewinnt.

In vollständig automatisierten mehrstufigen Fertigungsprozessen möchte man allerdings ohne dieses Personal und ohne die aufwendige Endkontrolle des Produktes auskommen. Ziel ist es, aus den Messergebnissen, die an verschiedenen Stufen des Fertigungsprozesses gewonnen werden auf die Endqualität des Produktes zu schließen und möglichst ebenfalls automatisiert die Fertigungsparameter nachzustellen, wenn sich Abweichungen von der gewünschten partikulären Qualität einstellen.

Die Schwierigkeit besteht darin, dass zunächst wegen des mehrstufigen Prozesscharakters kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen den partikulären Prozessmesswerten auf automatisierten Produktionsmaschinen und der Produktendqualität besteht. Auch die von der Qualitätskontrolle erstellten Datensammlungen bieten keine bemerkenswerten Verbindungen mit den Daten des Endproduktes und damit keine Möglichkeit, eine Prozessabschätzung hinsichtlich eines fehlerfreien Endzustandes vorzunehmen. Die Verbindungen zwischen partikulären Signalmustern und den Endqualitätsdaten sind nicht einfach erreichbar wegen des mehrstufigen Charakters des Produktionsprozesses [3].

Eine Möglichkeit dieses Verknüpfungsproblem zu behandeln liegt in der Nachforschung von intrinsischen Informationen und Auskünften, die in den Messgrößen enthalten sind. Ein Weg ist, den Shannon'sche Messwert auf Prozesssignalanlagen zu verwenden [4]. Wenn eine Shannon'sche Auswertung angewendet wird, werden die Abweichungen der partikulären Messwerte von den Sollwerten angezeigt. Diese können dann quantifiziert und als semantische Werte der Prozessvariablen dargestellt werden. Allerdings ist die Shannon'sche Maßeinheit nicht automatisch eine zweckmäßige Auskunft im Sinne von Kolmogorov [5].

Der Zweck dieser Betrachtung ist also die Erforschung von zielorientierten Auskünften in hoch automatisierten verketteten, mehrstufigen Produktionssystemen. Deswegen ist im Teil 2 eine Definition von zielorientierten Informationen gegeben. Teil 3 behandelt das so genannte Auskunftsmessen. Teil 4 schlägt eine hinreichende eindimensionale Carnap'sche Information als unikates Auskunftmaß für Produktionsprozesse vor. Die Anwendung dieses Maßes auf einer zweistufigen automatisierten Laboreinlage wird im Teil 5 vorgeführt. Die Diskussion und Schlussbemerkungen sind im Teil 6 bzw. Teil 7 gegeben.

2 Die Wichtigkeit von teleonomischen Auskünften in der automatisierten Produktion

Die Erforschung des dynamischen Auskunftflusses in Produktionsprozessen nimmt vielseitige Wechselwirkungen zwischen den Substanzmengen an, die die Basis solcher Prozesse bilden. Dabei handelt es sich um Materie, Energie und Information. Solche mengendefinierten Wechselwirkungen ermöglichen eine mathematische Strenge, weil man sich auf abzählbare Wechselwirkungen bezieht. Ein Produktionsprozess wird eindeutig durch seine zielorientierten spezifischen Systemwechselwirkungen erfasst. Sein zielorientierter Arbeitsgang wird in beschrieben durch:

- endgültige Produktmerkmale mit Qualitätseigenschaften, die vom Verbraucher definiert sind
- objektive Qualitätsmessungen
- Lenkungsmessungen im Produktionsprozess, die den Prozessstand reflektieren
- Produktionsunterziele, um die Rationalisierung der Produkt-Endqualitätskontrolle zu ermöglichen.

Die zielorientierte (= teleonomische) Managementplanung umfasst die Produktionstechnologie und menschenwürdige Arbeitsbedingungen und wird von Experten begleitet. Diese Managementplanung ist stark mit konkreten Geschäftsbetriebsrichtlinien verbunden. Teleonomie ist eine inhärente erfolgreiche Eigenschaft jeder Gesellschaft. Systembasierten Zutritt kann die harmonisierte Komponentenzusammenwirkung mit ihrer holistisch balancierten Vorgangsweise der ganzen Produktionslinie befördern.

Um die Teleonomie der ganzen Produktionslinie auszumessen, brauchen wir eine praktische Methode mit einer Beschreibung einer geeigneten Maßeinheit, die Information inhärent zur Prozessqualitätsvariablen ausdrücken kann. Also liegt unsere gesamte Systemforschung in der Beschreibung von relevanten teleonomischen Informationsinhalten im gegebenen Produktionsprozess.

3 Das Messen von Informationsinhalt im automatisierten Produktionsprozess

Dem Bedarf nach einer adäquaten Technik im Fall jeder Qualitätskontrolle ist in der Literatur ausdrücklich betont und führt zu einem Expertensystem mit QK-Regeln [1], die prinzipiell

- (a) an Prozeduren mit unverzüglichen Resultaten unabhängig von langfristig auswertbaren Faktoren arbeiten
- (b) zur Kombinationsexplosion führen können, wenn man vielfache Prozesselemente analysiert
- (c) nur mit solchen Tatsachen handeln, die von einem Benutzer bestimmt wurden und mit Versuchen an der Aufklärung eines QK-Problem erarbeitet wurden
- (d) dynamische Probleme behandeln sollen
- (e) nicht auf einen QK-Fall beschränkt sind.

Wenn man also auf menschliche und auf Prozess- Ressourcen vertraut, kommt man zu einer problematischen Situation, weil individuelle Experten dieselben Prozessdaten unterschiedlich interpretieren, also an verschiedene Semantiken anknüpfen, die manchmal entgegengesetzt gerichtet sind. Die Ursache liegt dabei meistens an Unmöglichkeit, die Beziehungen zwischen Ursachen und Folgen im automatisierten Produktionsprozess zu untersuchen.

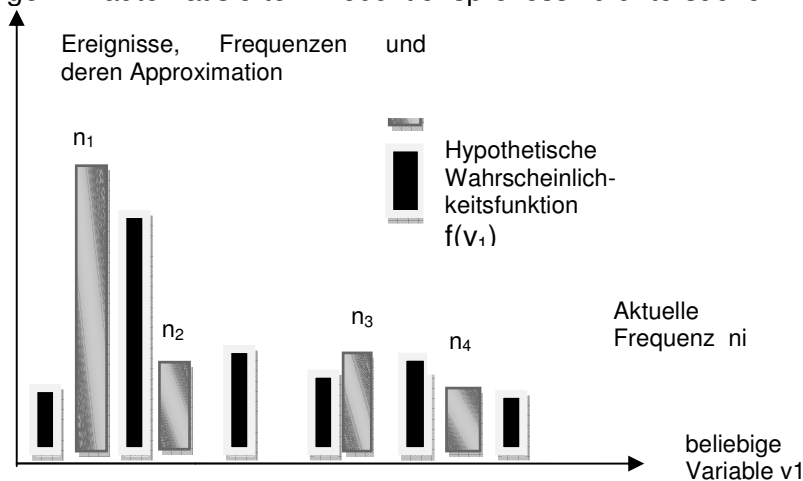


Bild 1: Prozessereignisse und beiliegende Wahrscheinlichkeitsverteilung – die Shannon'sche Entropieberechnung

$$H_{Shannon} = - \int_{-\infty}^{\infty} f(v_i) \log[f(v_i)] d[f(v_i)] \quad (1)$$

Ein kontrollierter Produktionsprozess wird mit Kontrolleinstellungen manipuliert, und dessen Variablen können mit Hilfe von stochastischer Informationsverarbeitung wie der Shannon'sche Entropie behandelt werden. Die Mehrzahl der Prozessvariablen bleiben dabei konstant oder

besitzen inhaltslose statistische Aussagen, die zu einer unbefriedigenden Lösung bei der Ermittlung der Shannon'sche Entropie führen können [6]. Die Shannon'sche Entropie erfordert deswegen eine längere Datenserie, was mit dem Anspruch an eine messabhängige schnelle Entscheidung kollidiert. Deswegen wird ein tessellarisches Entropiekonzept vorgeschlagen, das die Shannon'schen Mängel vermeidet [7]. Bild 1 illustriert einen ungeeigneten Fall der Shannon'sche Entropiemessung wegen der deutlichen Unterschiede in der Verteilungsfunktion.

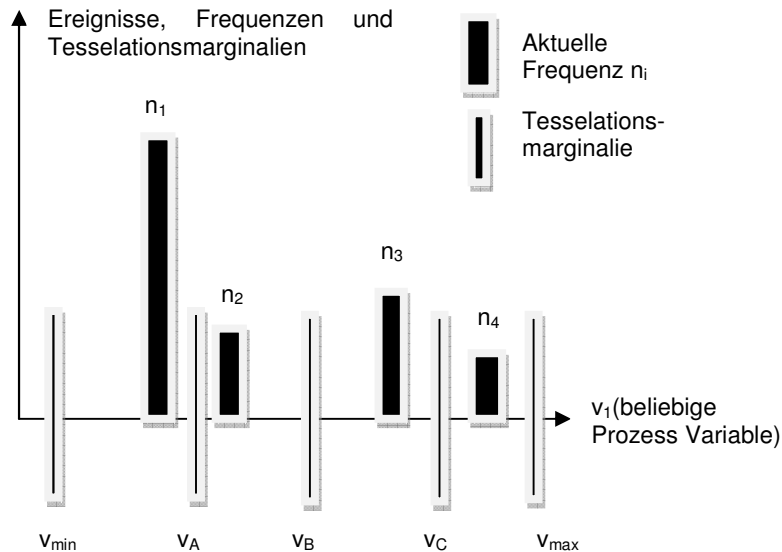


Bild 2: Prozessereignisverteilung – Berechnung der 1D-Tesselationsentropie

$$L = v_{max} - v_{min}, A = v_A - v_{min}, B = v_B - v_A \quad (2)$$

$$C = v_C - v_B, D = v_{max} - v_C \quad (3)$$

$$H_{1D} = n_1 \frac{A}{L} \log \frac{A}{L} + n_2 \frac{B}{L} \log \frac{B}{L} + n_3 \frac{C}{L} \log \frac{C}{L} + n_4 \frac{D}{L} \log \frac{D}{L} \quad (4)$$

Bild 2 weist in das Konzept der eindimensionalen Tesselationsentropie ein, und Bild 3 illustriert die Unterschiede zwischen den Prozessdaten und den QK-Anforderungen .

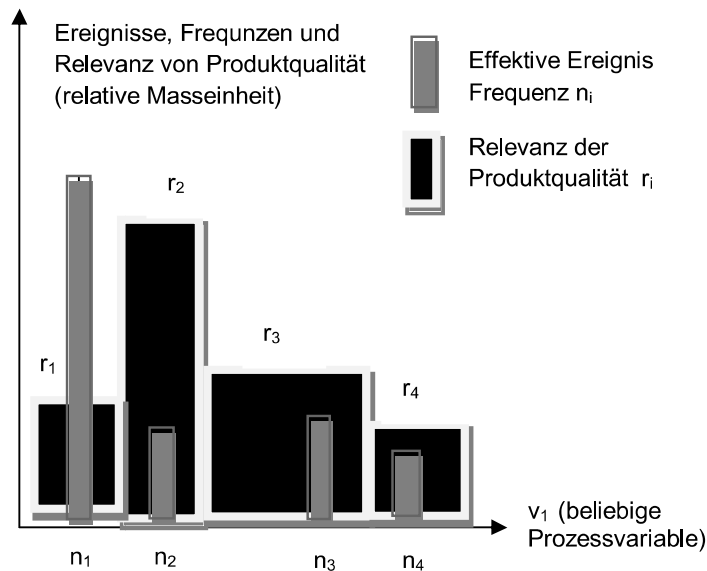


Bild 3: Uneinigkeit der Prozessereignisverteilung und entsprechende Qualitätsrelevanz

4. Eindimensionale Tesselationsentropie

4.1 Das Carnap'sche Entropiekonzept

Rudolf Carnap (1956) hat einen n -dimensionalen Systemraum innerhalb seiner theoretischen Grenzen R^μ eingeführt mit dem Parameter μ maximal gleich n . Jede Systemvariable u_i ist innerhalb ihrer Minimum- und Maximum-Werte im Raum Φ_i gegeben. Der relevante Besatzungsraum e_j ist für jeden Messpunkt $b_j(u_{i1}, u_{i2})$ definiert nach einem minimalen Abstandskriterium von den benachbarten Messpunkten. Deswegen tessellieren die Messpunkte $b_j(u_{i1}, u_{i2})$ des Systemraumes. Die Möglichkeit, die Beziehungen zwischen jedem Besatzungsraum und den theoretischen Grenzen jeweils als Duallogarithmus zu erklären, der hier in einem mit Shannon vergleichbaren Format gegeben ist, führt zum Carnap'schen Entropiekonzept mit

$$I_c = - \sum_j \frac{e_j}{R^\mu} \log_2 \frac{e_j}{R^\mu} \quad (\text{bit}) \quad (5)$$

Die Zeit-Trajektorie der Systemvariablen ist als seine erwünschte, also teleonomische Trajektorie beschreibbar. Dabei sind aber zwei Begrenzungen zu berücksichtigen: die Invarianz von Zeitinstanzen des Systemraumes und die Untoleranz an wiederholten Messzeitpunkten. Diese beide Begrenzungen kann man mit der eindimensionalen Carnap'schen Entropie vermeiden.

4.2 Eindimensionale Tesselationsentropie

Prinzipiell betrachtet das Carnap'sche Entropiekonzept enthält keine Teleonomie in ihren Definition, weil die dynamischen Vorgänge nicht rekonstruierbar sind. Deswegen hat man kleine Δ -modulierte Signalsegmente als Rekonstruktionsobjekte der Systemdynamik genommen: diesen Segmenten folgend kann man die Systemtrajektorien rekonstruieren. Jedes Messsignal kann sich als Δ -moduliertes Signal approximieren, also mit einer Einheitsschrittfolge genähert werden. Die Gleichung (5) für den eindimensionalen Fall liefert

$$I_C^{1D} = - \sum_{i=1}^k \frac{|d_i|}{x_k} \log_2 \frac{|d_i|}{x_k} \quad (6)$$

wo $|d_i|$ den Abstandsraum bedeutet, das jeder individuelle Messpunkt abdeckt. Gleichung (6) ergibt für einen positiven Einheitsprung Δ einen Informationsinhalt von

$$I^+ = \frac{L + \Delta/2}{L + \Delta} \log_2 \frac{L + \Delta/2}{L + \Delta} + \frac{\Delta/2}{L + \Delta} \log_2 \frac{\Delta/2}{L + \Delta} = I^{L+\Delta} (L + \Delta/2) + I^{L+\Delta} (\Delta/2)$$

und für einen negativen Einheitsprung Δ einen Informationsinhalt

$$I^- = I^L (L - \Delta/2) + I^L (\Delta/2)$$

Zwei konsekutive Schritte ergeben den Informationsinhalt von

$$I^{++} = I^{L+2\Delta} (L + \Delta/2) + I^{L+2\Delta} (\Delta) + I^{L+2\Delta} (\Delta/2)$$

oder
$$I^{+-} = I^{L+\Delta} (L + \Delta/2) + 2I^{L+\Delta} (\Delta/2)$$

oder
$$I^{-+} = I^L (L - \Delta/2) + I^L (\frac{\Delta}{2})$$

oder
$$I^{--} = I^L (L - \Delta - \Delta/2) + I^L (\Delta) + I^L (\Delta/2) \quad (7)$$

was von der Signalschrittfolge abhängt. Der 1D-Entropieinhalt eines Δ -modulierten Messsignal nach drei Schritten ist im Tabelle1 gegeben, wo man sieht, dass Fall 4 und Fall 7 dieselbe Entropie enthalten. Diese Gleichheit von zwei verschiedenen Ereignissen führt zum nicht eindeutigen teleonomischen Informationsmaß.

Fall	Signal Schritte	1D Signalentropie*
1.	I^{+++}	$I^{L+3\Delta L} \left(L + \frac{\Delta L}{2} \right) + 2I^{L+2\Delta L}(\Delta L) + I^{L+\Delta L} \left(\frac{\Delta L}{2} \right)$
2.	I^{++-}	$I^{L+2\Delta L} \left(L + \frac{\Delta L}{2} \right) + 2I^{L+\Delta L}(\Delta L) + I^{L-\Delta L} \left(\frac{\Delta L}{2} \right)$
3.	I^{+-+}	$2I^{L+\Delta L} \left(L + \frac{\Delta L}{2} \right) + 2I^{L-\Delta L} \left(\frac{\Delta L}{2} \right)$
4.	I^{-++}	$I^{L+\Delta L} \left(L - \frac{\Delta L}{2} \right) + 2I^{L-\Delta L}(\Delta L) + I^{L-\Delta L} \left(\frac{\Delta L}{2} \right)$
5.	I^{--+}	$I^L \left(L - \Delta L - \frac{\Delta L}{2} \right) + 2I^L(\Delta L) + I^L \left(\frac{\Delta L}{2} \right)$
6.	I^{---}	$2I^L \left(L - \frac{\Delta L}{2} \right) + 2I^L \left(\frac{\Delta L}{2} \right)$
7.	I^{+--}	$I^{L+\Delta L} \left(L - \frac{\Delta L}{2} \right) + 2I^{L-\Delta L}(\Delta L) + I^{L-\Delta L} \left(\frac{\Delta L}{2} \right)$
8.	I^{--+}	$I^{L+\Delta L} \left(L - 2\Delta L - \frac{\Delta L}{2} \right) + 2I^L(\Delta L) + I^L \left(\frac{\Delta L}{2} \right)$

$$I^L(\Delta L) = \frac{\Delta L}{L} \log_2 \left(\frac{\Delta L}{L} \right), \Delta L \text{ ist Schritthöhe, } L \text{ ist Anfangswert von Signale}$$

Tabelle 1. 1D Tesselationsentropie für ein Signal mit drei aufeinanderfolgenden Δ -Schrittenapproximiert

Eine ternäre Δ -Modulierung führt auch zu keinem Ausweg, wie es in Tabelle 2 dargestellt ist.

Codesignal Fluss	Signalmuster Verteilungsfunktion	Tessellationsentropiegleichnis	Codebezeichnung
0 0 0	4L	$I=4L/L \text{ Id } L/L=0$	a
0 0 +	3L, (L+ Δ)	$I=3(L+\Delta/2)/(L+\Delta) \text{ Id } (A)^*+(\Delta/2)/(L+\Delta) \text{ Id}(B)^*$	b=h=q
0 0 -	(L- Δ), 3L	$I=3(L-\Delta/2)/L \text{ Id } (A)^*+(\Delta/2)/L \text{ Id}(B)^*$	c
0 + 0	2L,2(L+ Δ)	$I=2(L+\Delta/2)/(L+\Delta) \text{ Id } (A)^*+2(\Delta/2)/(L+\Delta) \text{ Id}(B)^*$	d
0 - 0	2(L- Δ),2L	$I=2(L-\Delta/2)/L \text{ Id } (A)^*+2(\Delta/2)/L \text{ Id}(B)^*$	e=0=z
0 + +	2L,L+ Δ ,L+2 Δ	$I=2(L+\Delta/2)/(L+2\Delta) \text{ Id}(A)^*+(\Delta/2)/(L+2\Delta)\text{Id}(B)^*+(\Delta/2)/(L+2\Delta) \text{ Id}(C)^*$	f
0 - -	L-2 Δ ,L- Δ ,2L	$I=(L-(3/2)\Delta/2)/L \text{ Id } (A)^*+\Delta/L \text{ Id}(B)^*+2(\Delta/2)/L \text{ Id}(C)^*$	g
0 + -	3L,L+ Δ	$I=3(L+\Delta/2)/(L+\Delta) \text{ Id } (A)^*+(\Delta/2)/(L+\Delta) \text{ Id}(B)^*$	h=b=q
0 - +	L- Δ ,3L	$I=(L-\Delta/2)/L \text{ Id}(A)^*+3(\Delta/2)/L \text{ Id}(B)^*$	i=s
+ 0 0	L,3(L+ Δ)	$I=(L+\Delta/2)/(L+\Delta) \text{ Id}(A)^*+3(\Delta/2)/(L+\Delta) \text{ Id}(B)^*$	J
-0 0	3(L- Δ),L	$I=3(L-\Delta/2)/L \text{ Id } (A)^*+(\Delta/2)/L \text{ Id}(B)^*$	k
+ 0 +	L,2(L+ Δ),L+2 Δ	$I=(L+\Delta/2)/(L+2\Delta) \text{ Id}(A)^*+2(\Delta/2)/(L+2\Delta) \text{ Id}(B)^*+(\Delta/2)/(L+2\Delta) \text{ Id}(C)^*$	l
+ 0 -	2L,2(L+ Δ)	$I=2(L+\Delta/2)/(L+\Delta) \text{ Id}(A)^*+2(\Delta/2)/(L+\Delta)\text{Id}(B)^*$	m=v
-0 -	L-2 Δ ,2(L- Δ),L	$I=(L-(3/2)\Delta/2)/L \text{ Id}(A)^*+2\Delta/L \text{ Id}(B)^*+(\Delta/2)/L \text{ Id}(C)^*$	n=y
-0 +	2(L- Δ),2L	$I=2(L-\Delta/2)/L \text{ Id}(A)^*+2(\Delta/2)/L \text{ Id}(B)^*$	o=z=e
+ + 0	L,L+ Δ ,2(L+2 Δ)	$I=(L+\Delta/2)/(L+2\Delta) \text{ Id}(A)^*+(\Delta/2)/(L+2\Delta) \text{ Id}(B)^*+2(\Delta/2)/(L+2\Delta) \text{ Id}(C)^*$	p
+ - 0	3L,L+ Δ	$I=3(L+\Delta/2)/(L+\Delta) \text{ Id}(A)^*+(\Delta/2)/(L+\Delta) \text{ Id}(B)^*$	q=h=b
--0	2(L-2 Δ),L- Δ ,L	$I=2(L-(3/2)\Delta/2)/L \text{ Id}(A)^*+\Delta/L \text{ Id}(B)^*+(\Delta/2)/L \text{ Id}(C)^*$	r
-+ 0	L- Δ ,3L	$I=(L-\Delta/2)/L \text{ Id}(A)^*+3(\Delta/2)/L \text{ Id}(B)^*$	s=i
+ + +	L,L+ Δ ,L+2 Δ ,L+3 Δ	$I=(L+\Delta/2)/(L+3\Delta) \text{ Id}(A)^*+2(\Delta)/(L+3\Delta) \text{ Id}(B)^*+(\Delta/2)/(L+3\Delta) \text{ Id}(C)^*$	t
+ + -	L,2(L+ Δ),L+2 Δ	$I=(L+\Delta/2)/(L+2\Delta) \text{ Id}(A)^*+2(\Delta)/(L+2\Delta) \text{ Id}(B)^*+(\Delta/2)/(L+2\Delta) \text{ Id}(C)^*$	u
+ - +	2L,2(L+ Δ)	$I=2(L+\Delta/2)/(L+\Delta) \text{ Id}(A)^*+2(\Delta/2)/(L+\Delta) \text{ Id}(B)^*$	v=m
+ - -	L- Δ ,2L,L+ Δ	$I=(L-\Delta/2)/(L+\Delta) \text{ Id}(A)^*+2(\Delta)/(L+\Delta) \text{ Id}(B)^*+(\Delta/2)/(L+\Delta) \text{ Id}(C)^*$	w=aa
-- -	L-3 Δ ,L-2 Δ ,L- Δ ,L	$I=(L-(5/2)\Delta)/L \text{ Id}(A)^*+2\Delta/L \text{ Id}(B)^*+(\Delta/2)/L \text{ Id}(C)^*$	x
-- +	L-2 Δ ,2(L- Δ),L	$I=(L-(3/2)\Delta/2)/L \text{ Id}(A)^*+2\Delta/L \text{ Id}(B)^*+(\Delta/2)/L \text{ Id}(C)^*$	y=n
-+ -	2(L- Δ),2L	$I=2(L-\Delta/2)/L \text{ Id}(A)^*+2(\Delta/2)/L \text{ Id}(B)^*$	z=0=e
-+ +	L- Δ ,2L,L+ Δ	$I=(L-\Delta/2)/(L+\Delta) \text{ Id}(A)^*+2(\Delta)/(L+\Delta) \text{ Id}(B)^*+(\Delta/2)/(L+\Delta) \text{ Id}(C)^*$	aa =w

() * - bezeichnet den vorherigen Ausdruck der logarithmischen Funktion

Tabelle 2. Codesignal, Signalmuster Verteilungsfunktion, Tessellationsentropiegleichnis und Codebezeichnung für ternäre Approximation des Signalfusses

(Δ) ist Schritthöhe, L ist Anfangswert von Signale)

4.3 Informationsmaß eines vollexpandierten Δ -modulierten Messsignals

Eine Vollexpansion von Δ -modulierten Messsignalen wird vorgeschlagen, die zu einer Δ -Matrix führt. Auf diese Weise kann man von gegebenen Signaldaten ($L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$) eine Dreiecksmatrix berechnen mit Mess-differenzen zwischen allen Mengegliedern, wie es auch in [8] gemacht wurde:

$$I^M(k:\Delta L) = \begin{bmatrix} \Delta L_{1,2} & \dots & \Delta L_{k-1,k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \Delta L_{1,k} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Vollexpandierte Matrizen für Fall 4 und Fall 7 von Tabelle 1 ergeben folgende Dreiecksmatrizen:

$$I^M(-++) = \begin{bmatrix} -\Delta & \Delta & \Delta \\ - & 0 & \Delta \\ - & - & \Delta \end{bmatrix} \text{ bzw. } I^M(+--) = \begin{bmatrix} \Delta & -\Delta & -\Delta \\ - & 0 & -\Delta \\ - & - & -\Delta \end{bmatrix} \quad (9a,9b)$$

Wenn man jede nachfolgende Reihe der Dreiecksmatrix (9a, 9b) als eine neue Erweiterung des Carnapschen 1D-Informationsmaßes annimmt, kommt man zum Graph, der in Bild 4 dargestellt ist.

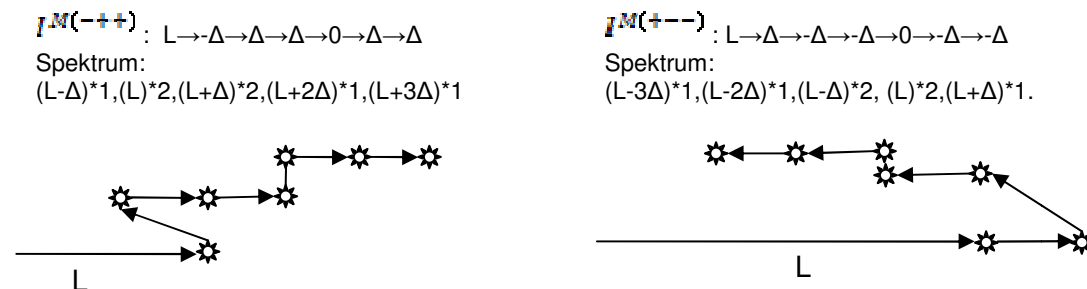


Bild 4: 1D-Tesselationsentropie des vollexpandierten Δ -modulierten Prozesssignals für den Fall 4 und Fall 7 als ein Beispiel der Signalteleonomie Lösung: ein sichtbarer Unterschied in Ausdehnungswegen beider Signale und im entsprechenden Entropieinhalt

Der vollständige Signalkode für vier Schrittemit kalkulierten Informationsentropie nach dem Gleichung (6) für expandierten Signaldaten ist am Tabelle 3. gegeben.

Code- zeichen	Vektorpräsentierte Expansionsmatrix	Verteilugs von Signalmustern	1D-Tesselationsentropie
A	000000	6L	0
B	00+0++	2L,2(L+Δ),L+2Δ,L+3Δ	$2\{(L+\Delta/2)/(L+3\Delta)\} \text{Id}\{A\}^* + 3\{\Delta/(L+3\Delta)\} \text{Id}\{B\} + \{(\Delta/2)/(L+3\Delta)\} \text{Id}\{C\}$
C	00-0--	L-3Δ,L-2Δ,2(L-Δ),2L	$\{(L-(5/2)\Delta)/L\} \text{Id}\{A\} + 3\{\Delta/L\} \text{Id}\{B\} + 2\{(\Delta/2)/L\} \text{Id}\{C\}$
D	0+0+++	L,2(L+Δ),L+2Δ,L+3Δ,L+4Δ	$\{(L+\Delta/2)/(L+4\Delta)\} \text{Id}\{A\} + 4\{\Delta/(L+4\Delta)\} \text{Id}\{B\} + \{(\Delta/2)/(L+4\Delta)\} \text{Id}\{C\}$
E	0-0---	L-4Δ,L-3Δ,L-2Δ,2(L-Δ),L	$\{(L-(7/2)\Delta)/L\} \text{Id}\{A\} + 4\{\Delta/L\} \text{Id}\{B\} + \{(\Delta/2)/L\} \text{Id}\{C\}$
F	0+++++	L,L+Δ,L+2Δ,L+3Δ,L+4Δ,L+5Δ	$\{(L+\Delta/2)/(L+5\Delta)\} \text{Id}\{A\} + 4\{\Delta/(L+5\Delta)\} \text{Id}\{B\} + \{(\Delta/2)/(L+5\Delta)\} \text{Id}\{C\}$
G	0-----	L-5Δ,L-4Δ,L-3Δ,L-2Δ,L-Δ,L	$\{(L-(9/2)\Delta)/L\} \text{Id}\{A\} + 4\{\Delta/L\} \text{Id}\{B\} + \{(\Delta/2)/L\} \text{Id}\{C\}$
H	0++00	2L,4(L+Δ)	$2\{(L+\Delta/2)/(L+\Delta)\} \text{Id}\{A\} + 4\{(\Delta/2)/(L+\Delta)\} \text{Id}\{B\}$
I	0+-00	4(L-Δ),2L	$4\{(L-\Delta/2)/L\} \text{Id}\{A\} + 2\{(\Delta/2)/L\} \text{Id}\{B\}$
J	+00+0+	3(L+Δ),2(L+2Δ),L+3Δ	$3\{(L+\Delta/2)/(L+3\Delta)\} \text{Id}\{A\} + 2\{\Delta/(L+3\Delta)\} \text{Id}\{B\} + \{(\Delta/2)/(L+3\Delta)\} \text{Id}\{C\}$
K	-00-0-	L-3Δ,2(L-2Δ),3(L-Δ)	$\{(L-(5/2)\Delta)/L\} \text{Id}\{A\} + 2\{\Delta/L\} \text{Id}\{B\} + 3\{(\Delta/2)/L\} \text{Id}\{C\}$
L	+0++++	2(L+Δ),L+2Δ,L+3Δ,L+4Δ,L+5Δ	$2\{(L+\Delta/2)/(L+5\Delta)\} \text{Id}\{A\} + 3\{\Delta/(L+5\Delta)\} \text{Id}\{B\} + \{(\Delta/2)/(L+5\Delta)\} \text{Id}\{C\}$
M	+0+-0	3L,3(L+Δ)	$3\{(L+\Delta/2)/(L+\Delta)\} \text{Id}\{A\} + 3\{(\Delta/2)/(L+\Delta)\} \text{Id}\{B\}$
N	-0----	L-5Δ,L-4Δ,L-3Δ,L-2Δ,2(L-Δ)	$\{(L-(9/2)\Delta)/L\} \text{Id}\{A\} + 3\{\Delta/L\} \text{Id}\{B\} + 2\{(\Delta/2)/L\} \text{Id}\{C\}$
O	-0++0	3(L-Δ),3L	$3\{(L-\Delta/2)/L\} \text{Id}\{A\} + 3\{(\Delta/2)/L\} \text{Id}\{B\}$
P	++0+++	L+Δ,2(L+2Δ),L+3Δ,L+4Δ,L+5Δ	$\{(L+\Delta/2)/(L+5\Delta)\} \text{Id}\{A\} + 4\{\Delta/(L+5\Delta)\} \text{Id}\{B\} + \{(\Delta/2)/(L+5\Delta)\} \text{Id}\{C\}$
Q	+00-0	2(L-Δ),3L,L+Δ	$2\{(L-\Delta/2)/(L+\Delta)\} \text{Id}\{A\} + 3\{(\Delta)/(L+\Delta)\} \text{Id}\{B\} + \{(\Delta/2)/(L+\Delta)\} \text{Id}\{C\}$
R	--0---	L-5Δ,L-4Δ,L-3Δ,2(L-2Δ),L-Δ	$\{(L-(9/2)\Delta)/(L-\Delta)\} \text{Id}\{A\} + 4\{\Delta/(L-\Delta)\} \text{Id}\{B\} + \{(\Delta/2)/(L-\Delta)\} \text{Id}\{C\}$
S	-+00+0	L-Δ,3L,2(L+Δ)	$\{(L-\Delta/2)/(L+\Delta)\} \text{Id}\{A\} + 3\{(\Delta)/(L+\Delta)\} \text{Id}\{B\} + \{(\Delta/2)/(L+\Delta)\} \text{Id}\{C\}$
T	+++++	L+Δ,L+2Δ,L+3Δ,L+4Δ,L+5Δ, L+6Δ	$\{(L+3\Delta/2)/(L+6\Delta)\} \text{Id}\{A\} + 4\{\Delta/(L+6\Delta)\} \text{Id}\{B\} + \{(\Delta/2)/(L+6\Delta)\} \text{Id}\{C\}$
U	+++0+	2(L+Δ),3(L+2Δ), L+3Δ	$2\{(L+3\Delta/2)/(L+3\Delta)\} \text{Id}\{A\} + 3\{\Delta/(L+3\Delta)\} \text{Id}\{B\} + \{(\Delta/2)/(L+3\Delta)\} \text{Id}\{C\}$
V	-++00+	L,4(L+Δ),L+2Δ	$\{(L+\Delta/2)/(L+2\Delta)\} \text{Id}\{A\} + 4\{\Delta/(L+2\Delta)\} \text{Id}\{B\} + \{(\Delta/2)/(L+2\Delta)\} \text{Id}\{C\}$
W	+--0--	L-3Δ,L-2Δ,2(L-Δ),L,L+Δ	$\{(L-(5/2)\Delta)/(L+\Delta)\} \text{Id}\{A\} + 4\{\Delta/(L+\Delta)\} \text{Id}\{B\} + \{(\Delta/2)/(L+\Delta)\} \text{Id}\{C\}$
X	-----	L-6Δ,L-5Δ,L-4Δ,L-3Δ,L-2Δ, L-Δ	$\{(L-(11/2)\Delta)/(L-\Delta)\} \text{Id}\{A\} + 4\{\Delta/(L-\Delta)\} \text{Id}\{B\} + \{(\Delta/2)/(L-\Delta)\} \text{Id}\{C\}$
Y	--+0-	L-3Δ,3(L-2Δ),2(L-Δ)	$\{(L-(5/2)\Delta)/(L-\Delta)\} \text{Id}\{A\} + 3\{\Delta/(L-\Delta)\} \text{Id}\{B\} + \{(\Delta/2)/(L-\Delta)\} \text{Id}\{C\}$
Z	-+00-	L-2Δ,4(L-Δ),L	$\{(L-(3/2)\Delta)/L\} \text{Id}\{A\} + 4\{\Delta/L\} \text{Id}\{B\} + \{(\Delta/2)/L\} \text{Id}\{C\}$
AA	-++0++	L-Δ,L, 2(L+Δ),L+2Δ,L+3Δ	$\{(L-\Delta/2)/(L+3\Delta)\} \text{Id}\{A\} + 4\{(\Delta)/(L+3\Delta)\} \text{Id}\{B\} + \{(\Delta/2)/(L+3\Delta)\} \text{Id}\{C\}$

Tabelle 3. Vollexpandierte Signale von Tabelle 2; Vektorpräsentierte Expansionsmatrix, Verteilungs von Signalmustern und Tesselationsentropie des expandierten Signals (Δ ist Schritthöhe, L ist Anfangswert von Signale)

Die allgemeine Expansionsformel für die Carnap'sche 1D-Entropie mit echte Signaldaten ist in [6] beschrieben.

5 Die Tessellationsentropie Analyse an einem analogen Labor-steuerungssystem

Eine zweistufige analoge Labor-Steuerungsanlage, die einen zweistufigen qualitätskontrollierten Prozess emuliert, wird als ein Prüfstand benutzt. Das Ziel ist, die Natur der Tessellationsinformation zu demonstrieren, die der Dynamik der Kontrollsignale folgt. Das System besteht aus einer Erwärmungseinheit und einer Mischanlage, die einen großen Behälter mit heißem Wasser versorgt. Die konzeptionelle Struktur der Prüfanlage ist im Bild 5 vorgestellt.

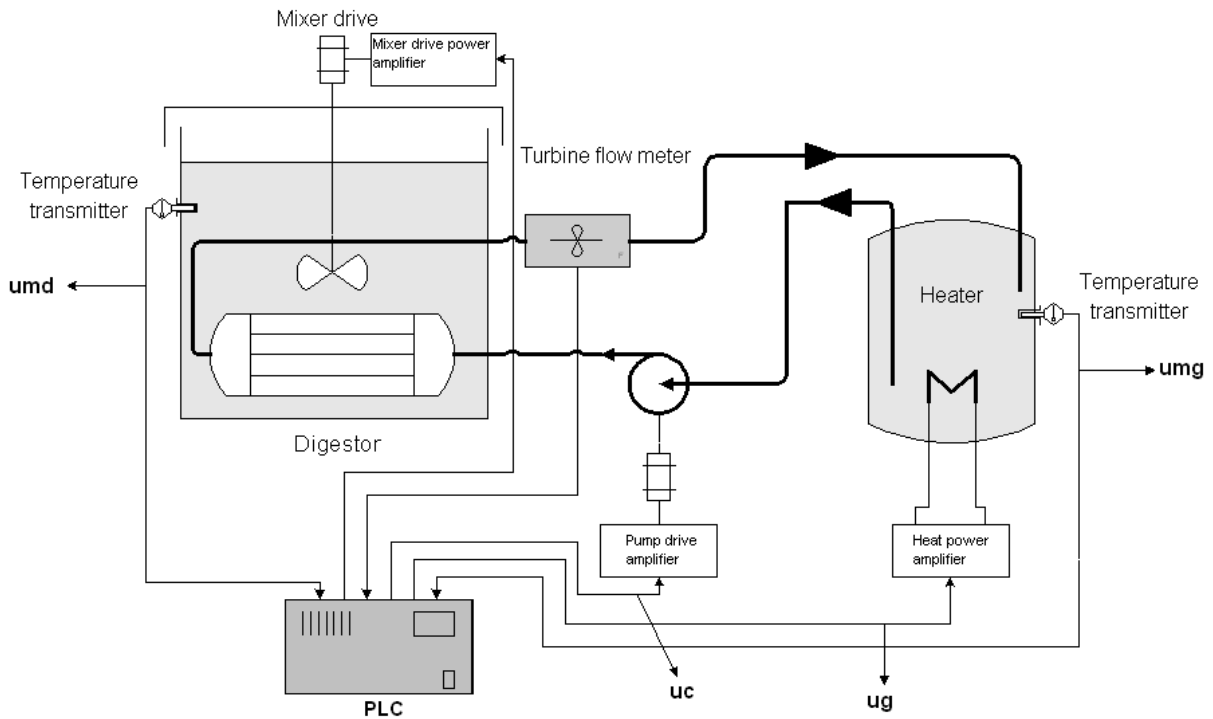


Bild 5: Zweistufiges Labormodell des automatischen Qualitätskontrollsystems

Je zwei Kontroll- und Mess-Signale folgten nach einem Erhöhungsschritt der Temperatur, die als Stellgröße diente. Der vollständige Zeitbereich war 5000 Sekunden. Aus diesem Zeitbereich wurden vier Abschnitte mit 0-116 s, 124-240 s, 242-474 s und 492-1212 s gewählt und in diesen jeweils 30 äquidistante Proben genommen. Anschließend wurden die respektiven Entropien in diesen Bereichen berechnet. Der Signalfloss des ganzen Experiments ist im [Bild 6](#) dargestellt.

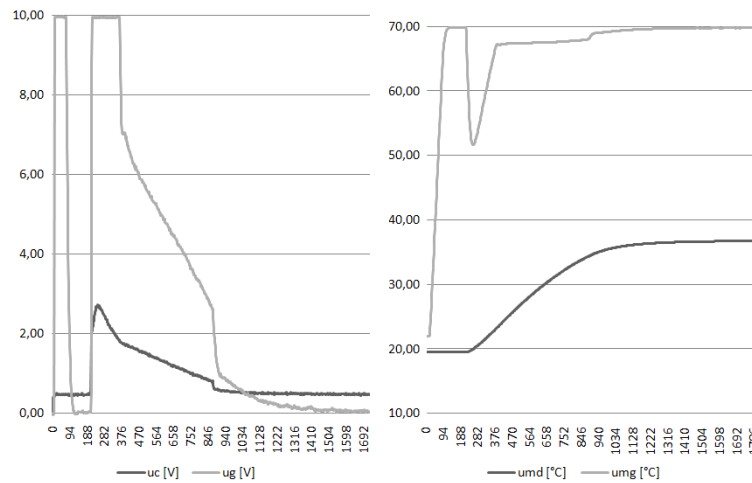
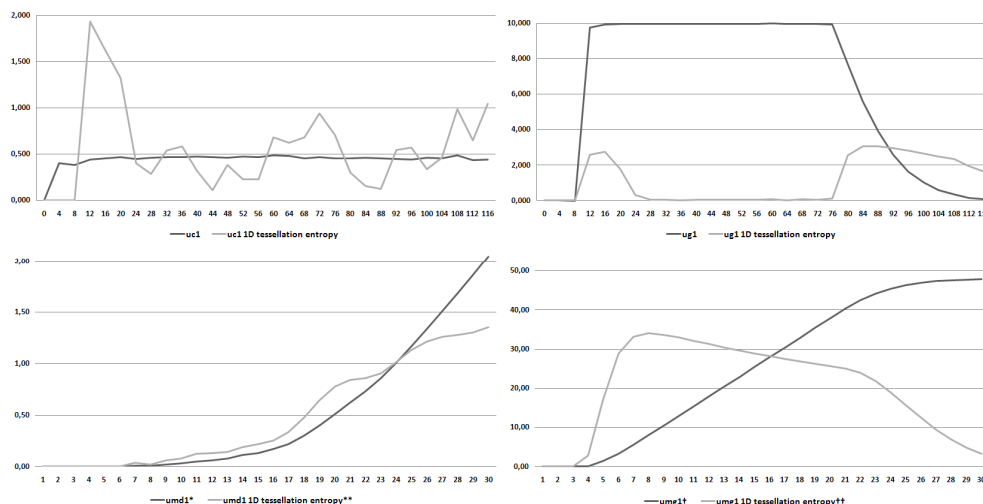


Bild 6: Signalen für Entropieanalyse des automatischen Qualitätskontrollesystems. Heizgerät Temperatursollwertwar 70°C in t=0 und Wasserbecken Temperatursollwert war 37°C in t=200s. Signalen: uc – Pumpesteuersignal, ug – Heizgerätsteuer Signal, und – Wasserbeckentemperatur Signal , umg – Heizgerät Wassertemperatur Signal.

Man sieht, dass für die Systemdynamik nur die ersten 1200 Sekunden verantwortlich sind. Ein ausführlicher Vergleich von Signalen ist im Bild 7 zusammen mit entsprechenden Tessellations-Entropien vorgestellt. Es soll angemerkt sein, dass die berechneten Entropiepunkte für drei Messproben verschoben sind, weil drei Veränderungen des Messsignals betrachtet wurden. Die erlangenen Entropien von Shannon, 1D Tessellation und 2D Tessellation sind im Tabelle 4. dargestellt.



Aus Grund besser Vergleichsmöglichkeit: * die angezeigte Variable ist $(umd1 - 19.5) \cdot 1000$, ** die Tessellationsentropie von umd1 war mit Faktor 50 multipliziert, † die Konstante 22.0 war von umg1 deduziert, †† die 1D Tessellationsentropie von umg1 war mit Faktor 20 multipliziert.

Bild 7: Signalen und entsprechenden 1D Tessellationsentropien für all Labor-signalen im Laufzeit 0-116 s. Steuerungssignale sind in bit/V und Meßsignale in bit/ °C dargestellt

Datenintervall	Entropie	Entropie von Pumpensteuersignal (uc) bit/V	Entropie von Heizgerätsignalsignal (ug) , bit/V	Entropie von Wasserbeckentempersignalsignal (umd), bit/V	Entropie von Heizgerät Wassertempersignalsignal (umg), bit/V
1–116	Shannon	NaN*	15.1826	18.2839	12.4693
	1D tessellation	0.6219	1.2441	0.0005	1.1327
	2D tessellation	2.2830	3.0209	4.1475	4.477
124–240	Shannon	NaN	14.6696	13.1876	13.0684
	1D tessellation	0.8641	2.1404	0.0311	0.3618
	2D tessellation	2.2896	Nicht kalkulierbar**	2.6843	Nicht kalkulierbar
242–474	Shannon	9.6729	NaN	5.0361	9.9045
	1D tessellation	0.8425	0.6112	0.4955	0.4352
	2D tessellation	4.5099	2.5943	4.8352	4.1209
482–1211	Shannon	13.0747	7.7612	6.3382	9.9122
	1D tessellation	1.2234	2.1243	0.5094	0.0857
	2D tessellation	4.0905	4.1877	4.6299	3.8030

Tabelle 4: Verschiedene Entropiedataien: Shannonsche Entropie, durchschnittliche 1D Tesselationsentropie und durchschnittliche 2D-Tesselationsentropie; kalkuliert für vier Datenserien: 1-116 s, 124-240 s, 242-474 s und 482-1212 s nach der schrittweise Änderung von Sollwerten auf dem Labor-Steuerungssystem (alle Daten waren in 30 s äquidistant Intervallen genommen)

6 Folgerungen

Qualitätsstandards wie ISO 3951-1:2005 [9] oder ISO 8423:2008 [10] verlangen „eine stabile Produktion (unter statistischer Kontrolle) und eine Qualitätscharakteristik, die eine Approximation Gauss'sche oder genäherte Gauss'sche Verteilung besitzen“. Das QA-Signal einer Fliesenproduktion zeigt einen Qualitätsstandard einer nicht angepassten Situation [6, 11], was meistens bei relativ kurzen Signalserien in der Qualitätskontrolle geschieht. Die korrekten Istdaten von Prozessmaschinen sind dabei nicht besonders hilfreich.

Generell betrachtet wird ein Prozess mit einer adäquaten Kontrolle der QK-Signale eine höhere statistisch betrachtete Qualität der Signale, als die Signale einer Abschlussprüfung zeigen. Aber das gilt auch für irrelevante Signale der Qualitätsprüfung. Die irrelevanten Signale komplizieren allerdings die Entscheidungen über den Qualitätseinfluss von partikulären Prozessanteilen auf die Endqualität der Produkte.

Funktionsfähig sind beide Zugänge: Expertenmeinungen zu verwenden, um die Prozesssignalwerte schätzen oder die Auswirkung eines Signales auf die Endproduktqualität zu messen. Die Zieleffekte der Signale zu messen heißt dieser Teleonomie zu folgen. Das Folgen aufgrund von teleonomischen Qualitätsdaten ist letztlich logisch und gesellschaftlich begründet.

Theoretische Betrachtungen des teleonomischen Auskunftsentropiegehaltes sind in dem Entropiekonzept von Kolmogorov enthalten. Das Shannon'sche Entropiekonzept ist nur für einzelne QK-Signale geeignet, deren Teleonomie nur indirekt messbar ist. Eine ernsthafte auf der Theorie von Shannon basierte Entropieanalyse der Industrieprozessen soll also aus folgenden Gründen vermieden werden:

- a) wegen Mangels an Datenverteilung für die Entropieberechnung, wie an Tabelle 4 dargestellt wird
- b) wegen strikter Möglichkeit, nur mit nummerierten Dateien sowie Buchstaben oder Zeichen zu operieren, weil die Operationen direkt mit numerischen Dateien nicht definiert ist.

Die Anwendung der 2D-Tesselationsentropie ist für quantitative Dateien geeignet, aber aus praktischen Gründen nicht empfehlenswert; dieses Verfahren benötigt immer wieder eine extrem große Berechnungszeit [6] und löst nicht die Probleme der vielfachen Prozessmessungen.

Eine erweiterte 1D-Tesselationsentropie, die in diesem Vortrag analysiert und für weitere Anwendungen an Entropiestudien der QK Signalen vorgeschlagen wird, hat die folgenden Eigenschaften: sie folgt der Prozessdynamik, sie ist einfach kalkulierbar, sie nimmt vielfache Prozessmessungen im Betracht und es braucht nur vier Prozessmessungen um einen 27-Ziffern-Kode zu generieren.

7 Zusammenfassung

Ein einfaches schnelles und leistungskomfortables Berechnungsverfahren für die Fehleranalyse an zielorientierten automatisierten Produktionssystemen wurde vorgestellt und beschrieben. Das Verfahren basiert hinsichtlich der Berechnungsvorgänge auf der erweiterten 1D-Tesselationsentropie. Man nimmt dazu ein QK-Signal als ein Vierpunkt-Muster und berechnet sechs Abtastdifferenzen als 1D-Projektion des Carnap'schen Entropiekonzeptes. So löst man das Shannon'sche Problem der Entropiekalkulation für unvollständige Distributionsdateien, wozu die Unauflösbarkeit des zielorientierter Prozessganges gehört. Die 2D-Tesselationsentropie ist dabei von keiner Hilfe, weil sie nicht für die Prozessdynamik geeignet ist.

Die präsentierte Analyse kann von Nutzen für QK-Ingenieure sein als ein Hilfsprogramm für einzigartige Folgewerkzeug der Prozessdynamik im Fällen, wo die Ausnahmen von QK-Standarden geschehen. Dieser Vorgang ist auch an teleonomischen Aspekten der Mann-Maschinen Kontrollsystemen aufwendbar.

Danksagung

Die Verfasser danken Prof. Robert Cupec von der Elektrotechnischen Fakultät im Osijek für die experimentell erzeugten Daten einer Kontrollsimulation. Die Recherchen wurden teilweise vom Kroatischen Bildungsministerium unter dem Kontrakt No. 1652017-2016 finanziell unterstützt.

Referenzen

- [1] E.P. Paladini, An expert system approach to quality control, *Expert Syst. Appl.* 18 (2000) 133–151.
- [2] Y.C. Lee, L.C. Sheu, Y.G. Tsou, Quality function deployment implementation based on Fuzzy Kano model: An application in PLM system, *Comput. Ind. Eng.* 55 (2008) 48–63.
- [3] I.T. Cameron, G. D. Ingram, A survey of industrial process modelling across the product and process lifecycle, *Comput. Chem. Eng.* 32 (2008) 420–438.
- [4] C.E. Shannon, A Mathematical Theory of Communication, *AT&T Tech. J.* 27 (1948 July) 379–423, (1948 Oct) 623–656.
- [5] A.N. Kolmogorov, *Information Theory and Theory of Algorithms*, Nauka, Moscow, 1987.
- [6] F. Jovic, D. Krmpotic, A. Jovic, Process entropy and informational macro-dynamics in a ceramic plant, in: N. Bogunovic, S. Ribaric (Eds.), *Proc. 32nd Int. Conf. MIPRO 2009*, vol. III CTS & CIS, Rijeka, Croatia, 2009, pp. 50–53.
- [7] A. Pudmetzky, Teleonomic Entropy Measuring the Phase-Space of End-Directed System, *Appl. Math. Comput.* 162 (2) (2005) 695–705.
- [8] Z. Jagnjic, N. Bogunovic, I. Pizeta, F. Jovic, Time series classification based on qualitative space segmentation, *Adv. Eng. Informat.* 23 (1) (2009) 116–129.
- [9] ISO 3951-1:2005: Sampling procedures for inspection by variables -- Part 1: Specification for single sampling plans indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot-by-lot inspection for a single quality characteristic and a single AQL, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2005.
http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=34640
- [10] ISO 8423:2008: Sequential sampling plans for inspection by variables for percent nonconforming (known standard deviation), International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2008. http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=41992
- [11] F Jovic, A. Jovic, D. Krmpotic: Quality control engineering in automated ceramic tile production using information content approach – ADVEI 2012 – in revision.