

Entwicklung einer Komplexitätsmetrik zur Planung von Montageprozessen in der Automobilindustrie

Steffen M. ALLMENDINGER

*AUDI AG, Ingolstadt
Ettinger Straße, D-85045 Ingolstadt*

Kurzfassung: Innerhalb des Automobilmarktes streben die Akteure eine Individualisierung ihres Produktprogrammes an. Infolgedessen steigt die Anzahl der Derivate und Varianten innerhalb der Montagelinien. Die Variantenvielfalt stellt neue Anforderungen an die Mitarbeitenden und nimmt verstärkt mentale Ressourcen in Anspruch. Ziel soll es somit sein, die variantenspezifische Komplexität einer Arbeitsfolge in Form einer Metrik zu objektivieren. Über die Beeinflussung komplexitätsabhängiger Faktoren sollen gezielt mentale Belastungen gesteuert werden.

Schlüsselwörter: Komplexität, Variabilität, Informationsverarbeitung, mentale Belastung, variantenreiche Montage, Montageplanung

1. Einleitung

Die Variantenvielfalt wirkt auf die in den Prozessen arbeitenden Personen und zwingt sie zu einem beständigen Umdenken und einer erhöhten Aufmerksamkeit, um die daraus resultierende Variation in den Arbeitsfolgen fehlerfrei zu beherrschen. Diese mentale Beanspruchung führt neben potenziellen Montagefehlern auch zu einer längeren Anlernzeit. Nicht zuletzt vor dem Hintergrund kürzer werdenden Produktlebenszyklen und der damit einhergehenden Zunahme an Anlaufsituationen erlangen die Anlerndauer und die Variantenvielfalt zunehmend an Bedeutung.

2. Theoretischer Hintergrund

Im Kontext eines Montagearbeitsprozesses beschreibt die DIN Norm EN ISO 10075-2 (2000) die Komplexität durch die zu treffenden Entscheidungen. Demnach besteht eine hohe Aufgabenkomplexität dann, wenn „der Operator zu viele Entscheidungen in einer bestimmten Zeiteinheit zu treffen hat“ (DIN EN ISO 10075-2 2000). Bedingt durch die Variantenvielfalt und der einhergehenden Anzahl an Elementen und der Variabilität des Arbeitsprozesses ergibt sich eine zunehmende Anzahl an zu treffenden Entscheidungen.

Ziel der dargestellten Studie ist es, eine Metrik zu entwickeln, die die Komplexität innerhalb der Linienmontage valide anhand eines mathematischen Modells abbildet. In der Literatur wird der Begriff Komplexität oftmals auch im Zusammenhang mit der Informationstheorie nach Shannon (1948) aufgeführt. Diese hat neben dem Begriff des Informationsgehalts auch den der Entropie geprägt. Nach dieser Theorie ist die Entropie ein Maß für die Unordnung bzw. Ungewissheit in einem System und bezieht sich auf die Auftrittswahrscheinlichkeit der Elemente innerhalb des Systems (Shannon, 1948). Das Prinzip des Informationsgehaltes und der Auftrittswahrscheinlichkeit lässt sich auf die Variantenvielfalt projizieren. Dementsprechend

stellt dies ein mögliches mathematisches Modell zur Charakterisierung mentaler Prozesse auf Basis der zu treffenden Entscheidungen dar.

Während des Informationsverarbeitungsprozesses werden intuitiv Strategien entwickelt, um die Informationsmengen bewältigen zu können. Die komplexitätsbedingte Informationslast kann somit durch den Einsatz kognitiver Aktivitäten reduziert werden (Kluwe, 1997). Beispielsweise können informell oder funktional zusammenhängende Elemente kognitiv zu einem Subsystem zusammengefasst werden, was eine Verdichtung von Informationen darstellt. Das Zusammenfassen von Subsystemen wird in der Literatur oftmals als Chunk-Bildung beschrieben (Kluwe, 1997).

Bei der Bildung des mathematischen Modells ist es demnach wichtig, dass der aufgeführte Aspekt ebenfalls berücksichtigt wird und die Modellierung die Chunk-Bildung mitberücksichtigen kann.

3. Objektivierung der Komplexität

Die Objektivierung der Komplexität stellt einen wesentlichen Baustein der Metrik dar, insbesondere hierfür soll infolgedessen ein mathematisches Modell erarbeitet werden. Grundlage hierbei bilden die zu treffenden Entscheidungen, die auf Basis der Shannon'schen Entropie (H) quantifiziert werden können. Die Auftretenswahrscheinlichkeiten (p_i) von Arbeitsfolgen, Betriebsmittel und Bauteile stellen hierbei die maßgebende Größe dar.

Es können verschiedene Ordnungen der Entropie unterschieden werden. Die Entropie 0. Ordnung berücksichtigt den determinierten Erwartungswert einer Arbeitsfolge i (bzw. eines Bauteils) an der Gesamtheit der Arbeitsfolgen (bzw. Gesamtheit der Stückliste) (Jeske, 2013). Neben der Entropie 0. Ordnung wird zudem die bedingte Entropie 1. Ordnung herangezogen. Dabei wird darüber hinaus die Verteilung der bedingten Wahrscheinlichkeit auf zwei aufeinanderfolgende Elemente berücksichtigt (Schlick und Winkelholz 2008). Sofern beispielsweise auf ein Hinlangen stets ein Greifen folgt, muss für das Greifen keine neue Entscheidung getroffen werden. Eine bedingte Wahrscheinlichkeit von $p_i=1$ und einem Entropiewert von $H=0$ wird bei der Entropie 1. Ordnung somit für das Greifen berücksichtigt. Dies geschieht ebenfalls auf Grundlage der Gesamtheit aller Arbeitsfolgen.

Um die beschriebene Chunk-Bildung in Gänze abbilden zu können, wird eine weitere Entropieebene ausgearbeitet. Diese soll die zusammenhängenden Arbeitsfolgen unabhängig des Beobachtungsrahmens bündeln und anhand eines Wahrscheinlichkeitsbaumes (Abbildung 1) darstellen können. Grundlage bildet die Entscheidung über eine konkrete Handlung innerhalb eines Wahrscheinlichkeitsbaumes. Arbeitsschritte, die der Entscheidung innerhalb dieses Astes folgen, stellen somit keine weitere Entscheidung dar und können mittels der Chunk-Bildung bis zur nächsten Zweigung zusammengefasst werden. Der Beobachtungsrahmen stellt den Unterschied zur Entropie 1. Ordnung dar. Folglich wird nicht die Gesamtheit der Arbeitsfolgen als determinierter Erwartungswert herangezogen, sondern die der einzelnen Äste innerhalb des Wahrscheinlichkeitsbaumes. Diese Interpretation der Entropie höherer Ordnung soll mit ihren Fortsetzungsalternativen die Chunk-Bildung mathematisch darstellen.

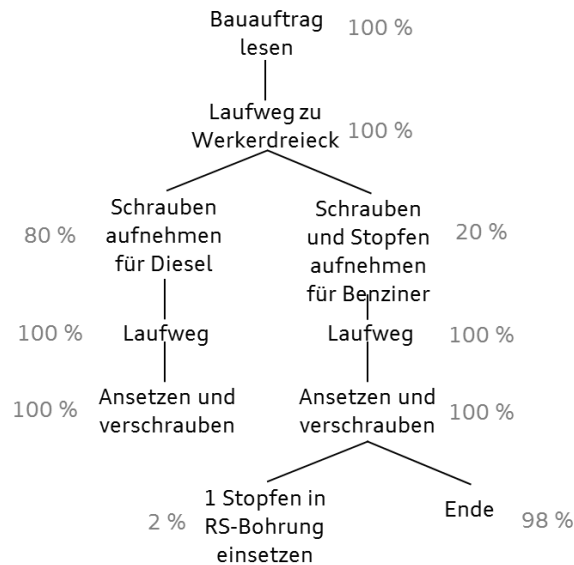


Abbildung 1: Beispiel eines Wahrscheinlichkeitsbaumes innerhalb der Variantenfertigung

Die bei dem untersuchten Automobilhersteller verwendeten Arbeitsvorgänge sind auf zwei Granularitätsebenen dargestellt. MTM-UAS bildet die detaillierteste Aggregationsebene dar. Auf Basis MTM-UAS werden tätigkeits- und variantenbezogenen Arbeitsschritte zu Arbeitsfolgen (AFO) aggregiert. Die Modellierung der Komplexität kann somit anhand von zwei Granularitätsebenen auf seine Robustheit überprüft werden.

4. Methode

Grundlage der Validierungsmethode bildet die Anlerndauer. Je komplexer eine Arbeitstätigkeit ist, desto länger wird benötigt, die Tätigkeit sicher zu beherrschen. Bezüglich der Informationsverarbeitung konnte bereits Jeske (2013) eine Korrelation zwischen Entropiewert 0. Ordnung und Anlerndauer nachweisen.

In einer explorativen Studie werden zunächst Arbeitsplätze anhand der dargestellten Objektivierungsgrundlage in ihren verschiedenen Ausprägungen und Ordnungen bewertet. Gruppenleiter, die die Einarbeitung vornehmen, beurteilen die durchschnittliche Anlerndauer an den jeweiligen Arbeitsplätzen. Die Gruppensprecher kennen die Arbeitsplätze ihrer Gruppe im Detail. Da diese die Einarbeitung kontinuierlich steuern und durchführen, basieren die Zeitwerte auf repräsentativen Erfahrungswerten. Somit bilden die Ergebnisse der Befragung eine geeignete Grundlage, um die mathematische Methode anhand der durchschnittlichen Anlerndauer darzustellen. Neben den dargestellten objektiven Bewertungskriterien werden die Belastungen zudem subjektiv anhand des NASA-TLX Verfahrens (Hart und Staveland, 1988) gemessen. Demzufolge werden die mentalen und körperlichen Anforderungen der jeweiligen Arbeitsplätze mit aufgenommen. Aufgrund des Einflusses sensumotorischer Anforderungen auf die Anlerndauer (Rohmert und Kirchner 1969, Luczak und Göbel 1996) werden die motorischen Anforderungen als subjektive Störvariable ebenfalls ermittelt. Dies geschieht analog der Items des NASA TLX Verfahrens.

Die Materialbereitstellung der Bauteile bietet durch die Verringerung der Verwechslungen eine Entscheidungsunterstützung innerhalb des Arbeitssystems. Aufgrund dessen werden die bereits implementierten prozessunterstützenden

Einrichtungen mitberücksichtigt. Die Objektivierung beinhaltet die Anzahl der Bauteile sowie die prozessunterstützenden Einrichtungen, wie bspw. ein Pick-by-Light Regal. Die Skalierung der Verwechslungsgefahr basiert dabei auf drei Ausprägungen und bezieht sich dabei auf die unterstützenden Einrichtungen sowie auf die Anzahl und Gleichheit (im Sinne der Geometrie) der Bauteile.

5. Ergebnisse

Ziel der Untersuchung ist die Bemessung des Einflusses der Gesamtentropie 0. Ordnung und 1. Ordnung auf die Anlernzeit innerhalb eines realen Montagearbeitsplatzes. Die unabhängige Variable stellt die Entropie dar, und ist durch eine Verhältnisskala charakterisiert. Als abhängige Variable wird die durchschnittliche Anlerndauer ermittelt. Die Stichprobe umfasst 43 Arbeitsplätze, die jeweils von 3 Gruppensprechern beurteilt wurden. Die Arbeitsplätze befinden sich in der Fahrwerkmontage und in der Türen- sowie Cockpitvormontage. Die Taktzeit der Arbeitsplätze beläuft sich auf jeweils 88 Sekunden. Die Einschätzungen der Gruppensprecher wurden getrennt voneinander aufgenommen.

Die Tabelle 1 zeigt den Zusammenhang der jeweiligen Entropiewerte und den angegebenen Anlerndauern. Unterschieden werden hierbei die verschiedenen Granularitätsebenen MTM-UAS und Arbeitsfolge (AFO) sowie die 3 dargelegten Bewertungsmethoden der Entropie (0. Ordnung, 1. Ordnung und 1. Ordnung bezogen auf einen Wahrscheinlichkeitsast). Anhand der Pearson Korrelation zeigt sich, dass lediglich bei der Entropie 0. Ordnung auf Arbeitsfolgenebene kein statistisch signifikanter Zusammenhang mit der Anlerndauer nachweisbar ist. Die Granularitätsebene auf MTM-UAS zeigt hingegen über allen drei Ordnungen einen signifikanten Zusammenhang.

Tabelle 1: Untersuchung der jeweiligen Entropiewerte bezogen auf die Bewegungselemente

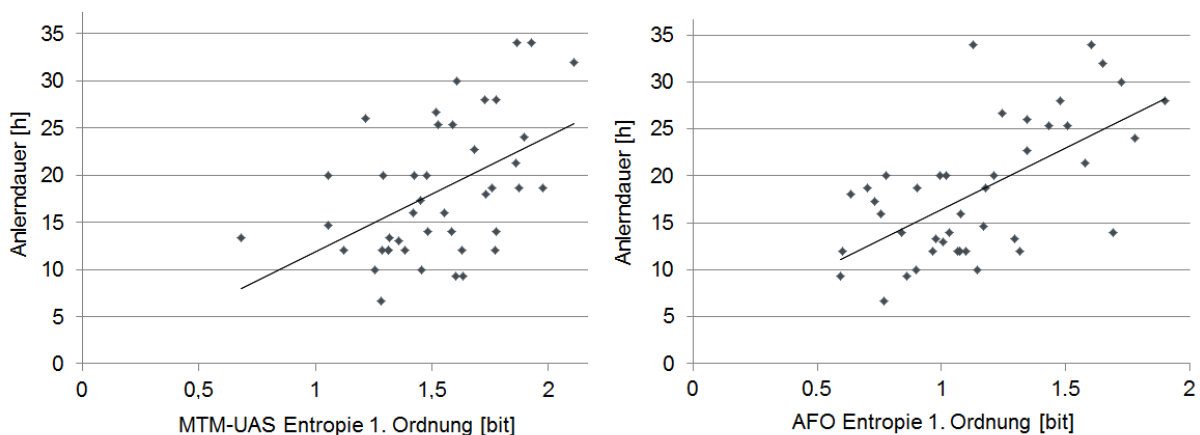
	MTM UAS Entropie 0. Ordnung	MTM UAS 1.Ordnung Grundgesamtheit: alle Arbeitsschritte je Takt	MTM UAS 1.Ordnung Grundgesamtheit: je String des Wahrscheinlichkeitsbaumes
Pearson Korrelation	,37	,49	,54
Sig.	,014*	,001*	,000*
n	43	43	43
	AFO Entropie 0. Ordnung	AFO 1.Ordnung Grundgesamtheit: alle Arbeitsschritte je Takt	AFO 1.Ordnung Grundgesamtheit: je String des Wahrscheinlichkeitsbaumes
Pearson Korrelation	,24	,62	,54
Sig.	,123	,000*	,000*
n	43	43	43

*Die Pearson Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 signifikant

Bei einer detaillierteren Betrachtung der Granularitätsebenen anhand der 1. Entropieordnung durch eine Regressionsanalyse (Tabelle 2) zeigt sich ein höheres R^2 bei der Arbeitsfolgenebene als bei der MTM-UAS-Ebene. Die Analyse der MTM-UAS-Ebene kann mit einem R^2 von 0,24 (mit $p = ,001$) die lineare Regression beschreiben, wohingegen die Regressionsgerade der Arbeitsfolgenebene ein R^2 von 0,38 (mit $p < ,001$) aufweist. Die beschriebenen Regressionen sind in Abbildung 2 aufgetragen.

Tabelle 2: Untersuchung der Granularitätsebenen auf Basis der Entropie 1. Ordnung

	Entropie 1. Ordnung			
	MTM-UAS		AFO	
Multiple R	0,49		0,62	
R Square	0,24		0,38	
Adjusted R Square	0,22		0,37	
Standard Error	6,37		5,71	
Observations	43		43	
Significance F	,001*		,000*	
	Coefficients	P-value	Coefficients	P-value
Intercept	-0,31	,954	3,24	,310
Entropie der Arbeitsvorgänge/ - folgen	12,18	,001*	13,16	,000*

**Abbildung 2:** Untersuchung der zwei Granularitätsebenen auf Basis der Entropie 1. Ordnung

Die Untersuchung bezüglich der Bauteile und der Betriebsmittel (Tabelle 3) zeigt über beide Ordnungen keinen statistisch signifikanten Zusammenhang hinsichtlich der Anlernzeiten. Somit kann ein Einfluss der Bauteil- und Betriebsmittelentropie auf die Anlerndauern nicht bestätigt werden.

Tabelle 3: Untersuchung der jeweiligen Entropiewerte bezogen auf die Bauteile und Betriebsmittel

	Bauteilentropie 0. Ordnung	Bauteilentropie 1. Ordnung	Betriebsmittelentropie 0. Ordnung	Betriebsmittelentropie 1. Ordnung
Pearson Korrelation	,14	,27	,08	,10
Sig.	,356	,085	,632	,543
n	43	43	43	43

*Die Pearson Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 signifikant

Die Ergebnisse der subjektiv aufgenommenen Anforderungen des Arbeitsplatzes hinsichtlich der Anlerndauer sind in Tabelle 4 dargestellt.

Es zeigt sich, dass, die Anlerndauer lediglich mit den mentalen Anforderungen korreliert. Die subjektiven Werte zur körperlichen und motorischen Anforderung zeigen keinen signifikanten Zusammenhang. Ferner konnte nicht bestätigt werden, dass die Unterscheidbarkeit der Bauteile einen maßgeblichen Einfluss auf die Anlerndauer hat.

Tabelle 4: Untersuchung der subjektiv aufgenommenen Belastungen

	mentale Anforderungen	motorische Anforderungen	körperliche Anforderungen	Unterscheidbarkeit Bauteile
Pearson Korrelation	,42	,25	,11	,24
Sig.	,005*	,101	,468	,116
n	43	43	43	43

*Die Pearson Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 signifikant

6. Diskussion und Ausblick

Bei der subjektiven Einschätzung der Arbeitsplätze ist neben der mentalen Anforderung kein weiterer Einfluss wie z.B. sensumotorische oder körperliche Anforderung nachweisbar. Insbesondere bekräftigt dies bei der Erarbeitung der Metrik den Fokus auf die Objektivierung der Komplexität im Sinne der Entscheidungen zu legen.

Die Untersuchung zeigt, dass durch Entropiewerte der ersten Ordnung über beide Granularitätsebenen die Anlerndauer vorhersagbar ist. Jedoch kann kein Einfluss der Bauteil- und Betriebsmittelentropie auf die Anlernzeit nachgewiesen werden. Die in die Untersuchung einfließenden Anlernzeiten beruhen lediglich auf subjektiven Einschätzungen der Gruppensprecher. Für die Validierung bedarf es somit einer Analyse mit objektiven Merkmalen. Dabei werden die Fehlerdaten einer kompletten Linie über ein Kalenderjahr herangezogen, um einen Einfluss der Entropie auf die Montagefehler zu untersuchen.

Über die Beeinflussung komplexitätsabhängiger Faktoren sollen langfristig gezielt mentale Belastungen gesteuert und somit die Produktivität erhöht werden. Insbesondere in der Montageplanung bietet die Metrik zu den bereits implementierten Methoden einen zusätzlichen Baustein bezüglich der mentalen Belastung. Zudem können unter anderem während der Anlaufsituationen neuer Modelle die Personalaufwände gezielt geplant werden.

7. Literatur

- Bokranz, R.; Landau, K. (2012). Handbuch Industrial Engineering - Band 2: Anwendung. Stuttgart: Schäffer Poeschel Verlag.
- EN ISO 10075-2 (2000). Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung - Teil 2: Gestaltungsgrundsätze, Berlin: Beuth.
- Shannon, C. (1948). A Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal 27 (3), S. 379 - 423.
- Jeske, T. (2013). Entwicklung einer Methode zur Prognose der Anlernzeit sensumotorischer Tätigkeiten. Aachen: Shaker.
- Kluwe, R. (1997). Informationsverarbeitung, Wissen und mentale Modelle beim Umgang mit komplexen Systemen. In: Störungsmanagement und Diagnosekompetenz. Sonntag, K. und Schaper, N.(Hrsg.). Zürich: vdf Hochschulverlag.
- Luczak, H.; Göbel M. (1996). Psychophysische Aspekte sensumotorischer Tätigkeiten. In: Ergonomie der Sensumotorik. (1996) Landau, K.; Luczak, H.; Laurig, W. (Hrg.) München, Wien: Hanser.
- Rall, K.; Dalhöfer, J. (2004). Komplexität indirekter Prozesse bei der Erstellung variantenreicher Produkte, in: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikplanung, 99. Jg., Nr. 11, S. 623 - 630.
- Schlick, C.; Winkelholz, C. (2008). Komplexität und Mensch-Maschine-Interaktion. In Ergonomie und Mensch-Maschine-Systeme. S. 353 - 370.
- Wildemann, H.; Voigt, K-I. (2011). Komplexitätsindex-Tool: Entscheidungsgrundlagen für die Produktprogrammgestaltung bei KMU. München: TCW-Verlag.