

Die neue VDI-Richtlinie zur Prognose von Umgebungseinflüssen in der Digitalen Fabrik

The new VDI guideline for the prognosis of environmental influences in the digital factory

Gert Zülch, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe (Germany),
gert.zuelch@gefora-beratung.de

Volker Keller, Stadler Rail Service Deutschland, Berlin (Germany),
volker.keller@stadlerail.com

Abstract: In order to regard working humans in simulation models and tools of the digital factory, three main aspects can be distinguished: One of them looks at humans as resources of the work system and analyses their performance in terms of production logistics in connection with the technical facilities. The second aspect includes human models with regard to their anthropometry and work physiology. These two aspects have already been reflected in former VDI guidelines. A new guideline deals with the influences of the indoor work environment. According to a fundamental ergonomic concept, on the one hand the physical influences are to be considered, on the other hand their effects on a working human. In addition, a distinction must be made between point-in-time related and time-period related analyses. For the latter in particular, the coupling to discrete event-driven simulation is necessary. The new VDI guideline will be explained here in more detail.

1. Problemstellung und Bezug zur Simulation

Der vorliegende Beitrag greift ein Thema auf, das bereits während der ASIM-Fachtagung 2019 in Chemnitz behandelt wurde, nämlich die Personaleinsatzsimulation im Rahmen der Digitalen Fabrik (Zülch 2019). Bei diesem Beitrag ging es um den Stand der Technik zur ergonomischen Analyse des arbeitenden Menschen in der Digitalen Fabrik (siehe Zülch 2020). Dazu wurde in der VDI-Richtlinie 3633 Blatt 6 aufgezeigt, wie die zeitliche Arbeitsbelastung und weitere makro-ergonomische Aspekte in existierenden Simulationsverfahren behandelt werden können. In mikro-ergonomischer Hinsicht wurden Verfahren zur anthropometrischen und arbeitsphysiologischen Arbeitsgestaltung angesprochen, die in der VDI-Richtlinie 4499 Blatt 4 behandelt werden (siehe zum Überblick Zülch 2013).

Die beiden genannten VDI-Richtlinienblätter behandeln gemäß dem Belastungs-Beanspruchungs-Konzept nach Rohmert (1984) nur einen ergonomischen Gesichtspunkt, nämlich die Effekte auf den arbeitenden Menschen durch die Arbeitsaufgabe selbst. Es fehlt also demnach noch, wie Belastungen und Beanspruchungen durch Einflüsse aus der (vorwiegend physikalischen) Arbeitsumgebung (siehe Abb. 1) in Werkzeugen der Digitalen Fabrik aufgegriffen werden können. Dieser Fragestellung wird im vorliegenden Beitrag anhand der neuen VDI-Richtlinie 4499 Blatt 5 nachgegangen (siehe VDI 2020). Da sich dieses Richtlinienblatt zurzeit in der Endphase seiner Veröffentlichung befindet, kann hier nur übersichtsweise auf einige methodische Punkte eingegangen werden.

2. Abgrenzung zu bisherigen Arbeiten

Das neue Richtlinienblatt ergänzt somit die vorigen, die sich mit der Einbeziehung des arbeitenden Menschen in die Digitale Fabrik befassen. Dazu lässt sich feststellen, dass es zwar – auch aufgrund des Arbeits- und Gesundheitsschutzes (siehe die geforderte Gefährdungsbeurteilung in § 5 f. ArbSchG) – umfangreiche Erkenntnisse zu den Effekten der Arbeitsumgebung auf den Menschen und zu rechtlichen Vorgaben hierzu gibt. Für deren Prognose existieren auch in Deutschland verfügbare Softwareverfahren, diese sind aber bis auf eine unten näher bezeichnete Ausnahme nicht in Verfahren der Digitalen Fabrik eingebunden. Die vorhandenen Verfahren stammen dabei nicht nur aus dem arbeitswissenschaftliche Umfeld, sondern zu einem großen Teil auch aus der Bauphysik und der Gebäudeplanung. Insofern stellt die Prognose von Umgebungseinflüssen auf den arbeitenden Menschen ein neues Feld der Digitalen Fabrik dar.

Aus dem internationalen Bereich sind kaum entsprechende Prognoseverfahren bekannt geworden. In der International Ergonomics Association gibt zwar ein Technical Committee „Digital Human Modeling and Simulation“, dieser Fachkreis befasst sich aber vorrangig mit der Menschmodellierung (siehe z.B. Briceno und Paul 2019). Auch in internationalen Ergonomiekongressen (z.B. Nunes 2020) und in neueren englischsprachigen Veröffentlichungen (z.B. Neumann et al. 2021) findet sich kaum ein Hinweis hierauf. Im nationalen Bereich gibt es ebenfalls nur wenige Veröffentlichungen, die auf die Bedeutung der Prognose von Umgebungseinflüssen hinweisen (siehe zu einer Ausnahme Illmann et al. 2015).

3. Vorgehensweise und Ergebnisse der Richtlinienerstellung

Den Anstoß zur Entwicklung der neuen VDI-Richtlinie 4499 Blatt 5 gab der übergeordnete VDI-Fachausschuss „Digitale Fabrik“. Dieser beauftragte dann einen speziell dafür eingerichteten Richtlinienausschuss mit der Erarbeitung. Die Entwicklung des Richtlinienblattes erstreckte sich seit deren Beginn im Jahre 2013 bisher über acht Jahre und umfasste in diesem Zeitraum eine Vielzahl von Expertentreffen.

Gegen Ende des Jahres 2020 legte der beauftragte Richtlinienausschuss eine Entwurfsfassung vor, die dann vom Fachausschuss genehmigt wurde (Abb. 1). Danach erfolgt nun eine Bearbeitung durch die VDI-Redaktion. Die daraus

resultierende vorläufige Fassung, der sog. Gründruck, wird voraussichtlich im Jahre 2021 veröffentlicht und damit für etwaige Einwände freigegeben.

VDI-RICHTLINIEN		
VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE	Digitale Fabrik Prognose von Umgebungseinflüssen auf den arbeitenden Menschen	VDI 4499 Blatt 5 Entwurf
Vorbemerkung		
Einleitung		
Gliederung dieses Richtlinienblattes		
1	Anwendungsbereiche	
2	Begriffe	
3	Grundlagen	
	3.1	Belastungs-Beanspruchungs-Konzept
	3.2	Bewertungs- und Beurteilungsmethoden
	3.3	Rechtliche Rahmenbedingungen
4	Analyse von Umgebungseinflüssen	
	4.1	Arbeitsraum (Geometrie, Reflexion, Absorption)
	4.2	Raumluft (Klima, Luftströmung, Gefahrstoffausbreitung)
	4.3	Mechanische Schwingungen (Lärm, Vibrationen)
	4.4	Elektromagnetische Schwingungen (Beleuchtung, Elektromagnetische Felder, Radioaktive Strahlung)
5	Anwendungsbeispiele	
	5.1	Prognose kombinierter Umgebungsbelastungen
	5.2	Visualisierung von Umgebungseinflüssen in einer CAVE
	5.3	Resümee der Prognose von Umgebungseinflüssen

Abbildung 1: Gründruck-Entwurf der VDI-Richtlinie 4499 Blatt 5

Erst nach Behandlung etwaiger Einwände erfolgt dann die endgültige Veröffentlichung im Beuth-Verlag in Berlin. In jüngerer Zeit werden die VDI-Richtlinien in Deutsch und Englisch veröffentlicht. Da sich der VDI wesentlich durch seine Richtlinien finanziert, sind die dann zur Verfügung stehenden Print- und Internetversionen kostenpflichtig.

Zu jedem der als wesentlich betrachteten Umgebungseinflüsse wird im Richtlinienblatt zumindest ein Anwendungsbeispiel beschrieben, das auf einem in Deutschland verfügbaren Softwareverfahren basiert. An dieser Stelle werden im vorliegenden Beitrag – unter Rückgriff auf frühere Arbeiten – einige grundsätzliche Probleme bei der Prognose von Umgebungseinflüssen behandelt.

4. Besondere Aspekte der Prognose von Umgebungseinflüssen

4.1 Arten der Prognose von Umgebungseinflüssen

In der VDI-Richtlinie 4499 Blatt 5 werden die auf den arbeitenden Menschen in einem umschlossenen Arbeitsraum wirkenden Umgebungseinflüsse behandelt.

Dabei wird gemäß dem Belastungs-Beanspruchungs-Konzept bei jedem der behandelten Einflüsse nach Belastung und Beanspruchung sowie nach deren Bewertung bzw. Beurteilung anhand normativer Vergleichswerte unterschieden (Abb. 2). Weiterhin wird eine Unterscheidung getroffen in personen- bzw. arbeitsplatzbezogene sowie nach zeitpunkt- und zeitraumbezogenen Prognosen. Für die zuletzt genannte Prognoseart ist die Verbindung mit einem ereignisdiskreten Simulationsverfahren erforderlich.

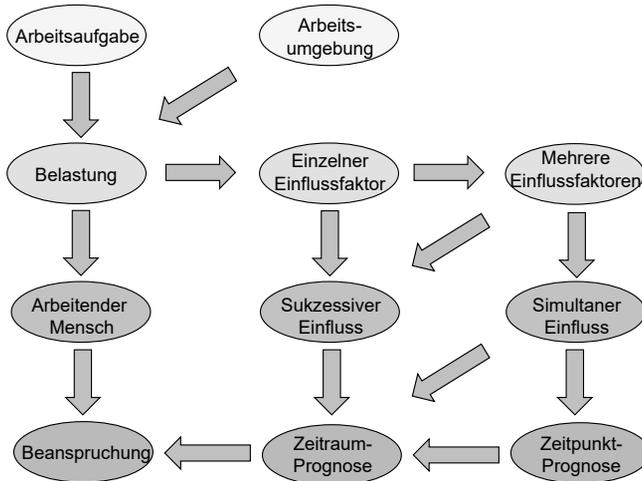


Abbildung 2: Arten der Belastungs-Beanspruchungs-Prognosen

Bei den Verfahren zeigen sich im praktischen Anwendungsfall oftmals Schwierigkeiten. Nachfolgend wird auf einige typische Problembereiche hingewiesen, die so auch bei Analysen in der Realität auftreten können. Bei den hier erörterten Anwendungsfällen handelt es sich um Zeitpunkt-bezogene Prognosen von Umgebungsbelastungen.

4.2 Validierung des Prognoseverfahrens

Eine wichtige Fragestellung betrifft die Validität des verwendeten Prognoseverfahrens, also im vorliegenden Fall die Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Werten eines einzelnen Umgebungseinflusses an einem Arbeitsplatz. Da in der Literatur keine entsprechenden Untersuchungen für Umgebungseinflüsse gefunden werden konnten, wird hier auf eine eigene frühere Studie zurückgegriffen (Keller 2002, S. 160 ff.).

Gegenstand dieser Validierungsstudie ist eine Werkstatt für die Produktion von Werkzeugen, in der neben fünf Maschinen für die spanende Bearbeitung auch ein Arbeitsplatz für die Montage der Werkzeuge vorhanden ist. Abbildung 3 zeigt das digitale Modell der Werkstatt und beispielhaft die Zeitpunkt-bezogene Berechnung des Schalldruckpegels am Montageplatz.

Zur Berechnung der Beleuchtungsstärken wurde das Radiosity-Verfahren (Ashdown 1994) verwendet. Der Vergleich zwischen den gemessenen und berechneten Werten

zeigte im Grundsatz eine gute Übereinstimmung (Tab. 1). Am Montageplatz und an den Maschinenbedienplätzen ergaben sich Abweichungen von 10 bis 27 lx, die vom menschlichen Auge kaum wahrgenommen werden können.

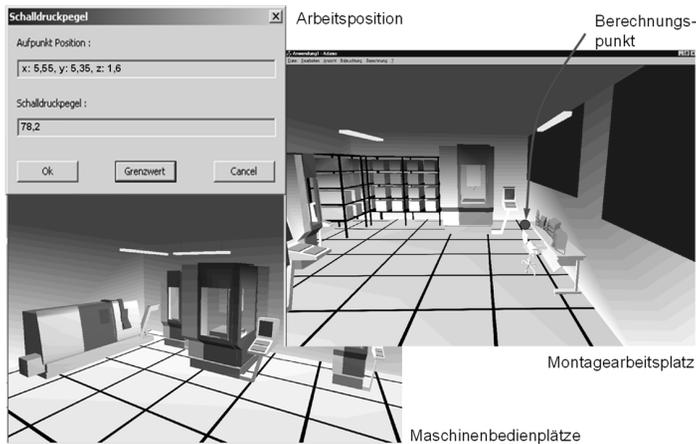


Abbildung 3: Werkzeugbau mit Berechnung des Schalldruckpegels an einem Arbeitsplatz (Quelle: Keller 2002, S. 159, ergänzt)

Tabelle 1: Gemessene und berechnete Umgebungsbelastungen in der betrachteten Werkstatt (nach Keller 2002, S. 161 f.)

Nr.	Arbeitsplatz	Beleuchtungsstärke, in lx		
		Messwert	Berechn.Ist	Abweichung
1	Drehmaschine	299	313	14
2	Sägemaschine	231	204	27
3	Fräsmaschine	310	328	18
4	Bohrmaschine	211	221	10
5	Schleifmaschine	95	83	12
6	Montageplatz	303	317	14
Nr.	Arbeitsplatz	Schalldruckpegel, in dB(A)		
		Messwert	Berechn.Ist	Abweichung
	Immission	jede Maschine einzeln im Leerlauf außer Betrieb		
1	Drehmaschine			
2	Sägemaschine	65,8	68,0	2,2
3	Fräsmaschine	80,3	77,3	3,0
4	Bohrmaschine	65,4	67,4	2,0
5	Schleifmaschine	67,9	65,8	2,1
6	Montageplatz Masch. 2 bis 5 in Betrieb	80,2	78,4	1,8

Die Schallausbreitung wurde für jede einzelne Maschine im Leerlauf mit dem Spiegelquellen-Verfahren nach VDI 3760:1992-02 berechnet. Beim Schalldruckpegel zeigten sich deutliche Abweichungen, die maximal 3,0 dB(A) erreichten. Die Ungenauigkeit liegt damit im Bereich orientierender Messgeräte und ist daher im Rahmen der Digitalen Fabrik als akzeptabel anzusehen. Die Abweichungen hängen aber auch von der verwendeten Berechnungsmethode ab. Eine zusätzliche Ungenauigkeit ist darin begründet, dass zur Vermeidung hoher Rechenzeiten sämtliche Einrichtungen und Betriebsmittel in der Werkstatt vereinfachend als Quader angenommen werden mussten (Keller 2002, S. 154).

4.3 Anwendungsbeispiel zur Umplanung einer Werkstatt

Die typische Anwendung einer Prognose von Umgebungseinflüssen in der Digitalen Fabrik besteht darin, alternative Gestaltungslösungen in einem Arbeitsraum zu analysieren. Abbildung 4 zeigt dazu – wiederum am Beispiel des obigen Werkzeugbaus - die Ausgangssituation und eine der möglichen Layout-Alternativen zur Verbesserung der Umgebungsbelastungen (Keller 2002, S. 156 ff.).

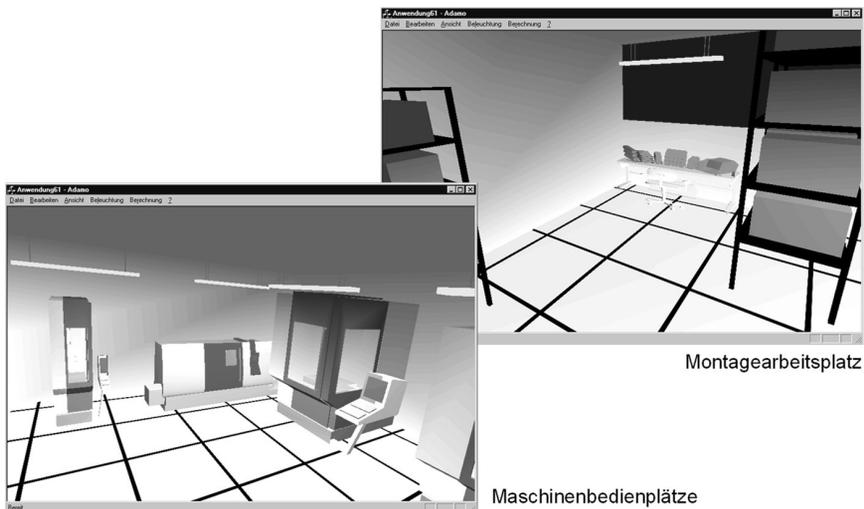


Abbildung 4: Layout-Alternative in der betrachteten Werkstatt zur Verbesserung der Umgebungsbelastungen (Keller 2002, S. 173)

Anhand dieser Planungsstudie wurden zur Verbesserungen des Ausgangszustands die Beleuchtungssituation und die Schallausbreitung an den Arbeitsplätzen analysiert und die Effekte in verschiedenen Layout-Alternativen prognostiziert (Tab. 2). Mit der Radiosity-Methode ergaben sich Beleuchtungsstärken, die an allen Arbeitsplätzen Werte erreichten, welche die Vorgaben nach DIN EN 12464-1:2003-03 voll erfüllten. Vor allem an der Schleifmaschine konnte die ungünstige Beleuchtungssituation von 83 lx auf 378 lx wesentlich verbessert werden.

Table 2: Planungsstudie zur Verbesserung der Umgebungsbelastungen in der betrachteten Werkstatt (nach Keller 2002, S. 170 ff.)

Nr.	Arbeitsplatz	Beleuchtungsstärke, in lx		
	Immission	Berechn.Ist	Berechn.Plan bei Layoutänderung	Bemerkung
1	Drehmaschine	313	413	
2	Sägemaschine	204	349	
3	Fräsmaschine	328	356	
4	Bohrmaschine	221	386	
5	Schleifmaschine	83	378	
6	Montageplatz	317	466	Abschirmwand
Nr.	Arbeitsplatz	Schalldruckpegel, in dB(A)		
	Immission	Berechn.Ist einzel im Leerlauf	Berechn.Plan bei Stahlbearb.	Bemerkung
1	Drehmaschine	(82,5)	[89,0]	(Tabellenwert)
2	Sägemaschine	68,0	[89,0]	
3	Fräsmaschine	77,3	[83,5]	
4	Bohrmaschine	67,4	[74,0]	
5	Schleifmaschine	65,8	[90,0]	
6	Montageplatz Masch. 1 bis 5 in Betrieb	78,4	(81,0) [90,1]	[Stahl Ck 45 N]

Hierbei zeigten sich einige praktische Schwierigkeiten der Prognose: Die Schalldruckpegel an den Maschinenbedienplätzen wurden einzeln im Leerlauf der jeweiligen Maschine ermittelt, ohne dass zunächst die übrigen Maschinen in Betrieb waren (Tab. 1). Diese Annahme wurde für das relativ kleine Arbeitssystem mit nur wenigen Bedienpersonen als angemessen angesehen. Außerdem war aus betrieblichen Gründen die Drehmaschine bei der Berechnung ihres Immissionswertes ausgenommen. Hierfür wurde der Tabellenwert nach VDI 3742-1:1981-02 mit 82,5 dB(A) eingesetzt (Tab. 2). Unter diesen Voraussetzungen ergab sich speziell für den Montageplatz ein Schalldruckpegel von 81,0 dB(A).

Nimmt man aber an, dass an allen Werkzeugmaschinen Stahl bearbeitet wird, so erhält man dort einen Schalldruckpegel von 90,1 dB(A), was nach der Berufsgenossenschaftlichen Vorschrift VBG 121 (1990; jetzt LärmVibrationsArbSchV 2017) das Tragen persönlicher Gehörschutzmitteln erforderlich machen würde (ebd. § 8). Bei dieser Berechnung wurden die Schalldruckpegel der einzelnen Werkzeugmaschinen für die Bearbeitung der Stahlsorte Ck 45 N angesetzt (siehe Richtlinienreihe VDI 3742).

5. Weiterentwicklung von Umgebungsprognosen in der Digitalen Fabrik

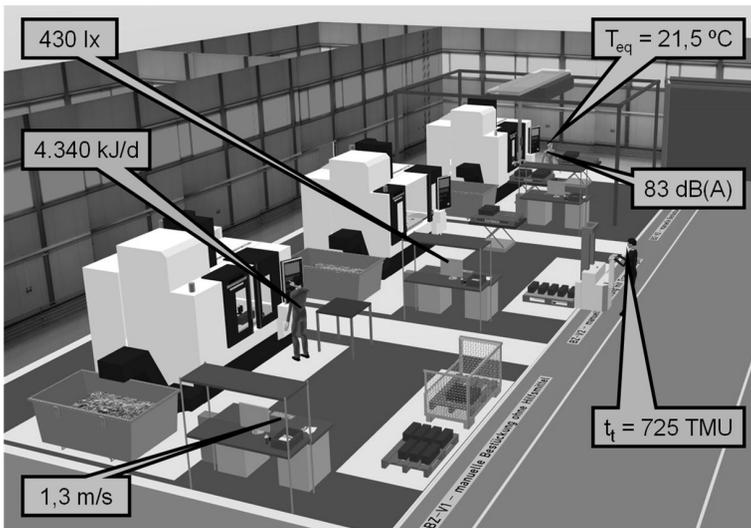
Für die Prognose von Umgebungseinflüssen ist bereits eine Vielzahl von Berechnungsmethoden vorhanden. Diese beziehen sich aber vorwiegend auf

einzelne Belastungsarten; die zugehörigen Softwareverfahren sind (bis auf wenige Ausnahmen) nicht in Verfahren der Digitalen Fabrik integriert. Bezüglich der resultierenden Beanspruchungen des arbeitenden Menschen gibt es erste Methoden und Softwareverfahren.

Außerdem handelt es sich bei den verfügbaren Verfahren in aller Regel um Zeitpunkt-bezogene Bewertungen, für Zeitraum-bezogene fehlen vielfach geeignete Methoden. Für die sukzessive Belastung durch einen einzelnen Umgebungseinfluss gibt es nur wenige Beispiele; diesbezüglich kann beispielhaft auf die Berechnungsmethode zur Bewertung eines schwankenden Schalldruckpegels hingewiesen werden (personenbezogener Tages-Lärmexpositionspegel nach § 2 Abs. 2 LärmVibrationsArbSchV).

Erst recht fehlt es an Bewertungsmethoden und -verfahren für simultan wirkende Umgebungseinflüsse, und dies dann auch für Kombinationen aus unterschiedlichen Belastungsarten durch die Arbeitsaufgabe und die Arbeitsumgebung. Ein Gegenbeispiel ist die Bewertung von energetisch belastender Hitzearbeit (siehe z.B. BGHM 2013, S. 14 ff.). Diesbezüglich fehlt es an integrierenden Methoden; ein hierzu entwickelter lexikographischer Ansatz bei gleichzeitig wirkenden Einflüssen (Zülch und Zülch 2017, S. 42) kann nur eine Behelfslösung darstellen.

Dies alles zeigt, dass es eine Vielzahl offener Fragestellungen zur Prognose von Umgebungseinflüssen in Werkzeugen der Digitalen Fabrik gibt. Bis zu einer umfassenden Prognose bedarf es also noch vielfacher Forschungsanstrengungen (Abb. 5).



Legende der Bewertungskriterien:

Produktionslogistik
 Arbeitsaufgabe
 Arbeitsumgebung

Abbildung 5: Vision der Prognose ergonomischer Belastungen in der Digitalen Fabrik (Layout-Graphik: Spitzhirn 2020)

Literatur

- ArbSchG: Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz - ArbSchG). Vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 22. Dezember 2020 (BGBl. I S. 3334). <https://www.gesetze-im-internet.de/arbSchG/ArbSchG.pdf>, letzter Zugriff 28.01.2021.
- Ashdown, I.: Radiosity. New York, NY u.a.: John Wiley & Sons 1994.
- BGHM – Berufsgenossenschaft Holz und Metall: Hitzearbeit erkennen – beurteilen – schützen. Mainz: BGHM 2013 (BGI 579).
- Briceno, L.; Paul, G.: MakeHuman: A Review of the Modelling Framework. In: Bagnara, S.; Tartaglia, R.; Albolino, S.; Alexander, T.; Fujita, Y. (Hrsg.): Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018). Cham: Springer 2019, S. 224-232. (Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 822). https://rd.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-96077-7_23, letzter Zugriff 28.01.2021.
- Brinkmeier, B.: Persönliche Mitteilung. Fellbach: Siemens Industry Software. Düsseldorf: VDI, Präsentation 13.01.2017.
- DIN EN 12464-1:2003-03: Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen. Berlin: Beuth Verlag.
- Illmann, B.; Fritzsche, L.; Ullmann, S.; Leidholdt, W.: Ganzheitliche Gefährdungsbeurteilung mit digitalen Menschmodellen – Die Integration von Umgebungsbedingungen in die Digitale Fabrik. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg.): VerANTWORTung für die Arbeit der Zukunft. Dortmund: GfA Press 2015, 6 S.
- IBP – Fraunhofer-Institut für Bauphysik: BNB-Tool Thermischer Komfort. Holzkirchen: Fraunhofer IBP, 2014. <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/produktblaetter/ee/produktblatt-bnb-tool.pdf>, letzter Zugriff 08.03.2021.
- Keller, V.: Ansatz zur objektorientierten Modellierung betrieblicher Arbeitsschutzdaten. Aachen: Shaker Verlag 2002 (ifab-Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 25).
- Keller, V.; Zülch, G.: Repräsentation von Arbeitsschutzdaten und ihre Visualisierung in rechnerunterstützten Managementsystemen. In: Zülch G, Brinkmeier, B. (Hrsg.): Arbeitsschutz-Managementsysteme. Aachen: Shaker 2000, S. 219–229.
- LärmVibrationsArbSchV: Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung. Vom 06.03.2007 (BGBl. I S. 261); zuletzt geändert durch Art. 5 Abs. 5 der Verordnung vom 18.10.2017, BGBl. I Nr. 69 vom 23.10.2017, S. 3584. https://www.gesetze-im-internet.de/l_rmVibrationsarbschv/L%C3%A4rmVibrationsArbSchV.pdf, letzter Zugriff 21.04.2021.
- Neumann, W. P.; Winkelhaus, S.; Grosse, E. H.; Glock, C. H.: Industry 4.0 and the human factor – A systems framework and analysis methodology for successful development. International Journal of Production Economics, Amsterdam, 233 (2021), 18 S. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107992>, letzter Zugriff 29.01.2021.

- Nunes, I. L. (Hrsg.): *Advances in Human Factors and Systems Interaction. Proceedings of the AHFE 2020 Virtual Conference on Human Factors and Systems Interaction, July 16-20, USA.* Heidelberg & Berlin: Springer 2020. <https://rd.springer.com/book/10.1007%2F978-3-030-51369-6>, letzter Zugriff 29.01.2021.
- Rohmert, W.: Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 38 (1984), S. 193–200.
- Schneck, M.: Persönliche Mitteilung. Fellbach: Delmia Systemes, 11.07.2009.
- Spitzhirm, M.: Persönliche Mitteilung. Chemnitz: imk automotive, 13.12.2020.
- VBG 212: Berufsgenossenschaftliche Vorschriften, Unfallverhütungsvorschrift Lärm, Januar 1990.
- VDI 3633-6:2001-10: Digitale Fabrik - Ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik. Berlin: Beuth. <https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-3633-blatt-6/44890290>, letzter Zugriff 21.04.2021.
- VDI 3742 Richtlinienreihe Blatt 1 bis 6, 1981-2 bis 1983-6: Emissionskennwerte technischer Schallquellen; Spanende Werkzeugmaschinen. Berlin: Beuth.
- VDI 3742-1:1981-02: Emissionskennwerte technischer Schallquellen; Spanende Werkzeugmaschinen; Drehmaschinen. Berlin: Beuth. <https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-3742-blatt-1/547180>, letzter Zugriff 21.04.2021.
- VDI 3760:1992-02: Berechnung und Messung der Schallausbreitung in Arbeitsräumen. Berlin: Beuth. <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=Beuth+VDI+3742-1%3A1981-02>, letzter Zugriff 21.04.2021.
- VDI 4499-4:2015-03: Digitale Fabrik - Ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik. Berlin: Beuth. <https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-4499-blatt-4/222813009>, letzter Zugriff 21.04.2021.
- VDI – Verein Deutscher Ingenieure (2020): VDI 4499-5 - Projekt. Digitale Fabrik: Prognose von Umgebungseinflüssen auf den arbeitenden Menschen. Berlin: Beuth. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4499-blatt-5-digitale-fabrik-prognose-von-umgebungseinflussen-auf-den-arbeitenden-menschen>, letzter Zugriff 26.01.2021.
- Zülch, G.: Ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik – Die neue VDI-Richtlinie 4499-4. In: Dangelmaier, W.; Laroque, C.; Klaas, A. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2013*. Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe 2013 S. 53-60 (ASIM-Mitteilung Nr. 147).
- Zülch, G.: Entwicklung und Stand der Personaleinsatzsimulation und deren Einbindung in die Digitale Fabrik. In: Putz, M.; Schlegel, A. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2019*. Auerbach: Verlag Wissenschaftliche Scripten 2019, S. 183-192 (ASIM-Mitteilung Nr. 172).
- Zülch, G.: Development and Status of Personnel Deployment Simulation and its Inclusion into the Digital Factory. *SNE Simulation Notes Europe* 30 (2020) 4, S. 197-202.
- Zülch, M.; Zülch, G.: Production logistics and ergonomic evaluation of U-shaped assembly systems. *International Journal of Production Economics* 190 (2017), S. 37-44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.01.004>, letzter Zugriff 05.07.2017.