

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Digitale Fabrik
Prognose von Umgebungseinflüssen
auf den arbeitenden Menschen

VDI 4499
Blatt 5
Entwurf

Digital factory – Prediction of environmental influences on the working person

Einsprüche bis 2022-02-28

- vorzugsweise über das VDI-Richtlinien-Einspruchsportal <http://www.vdi.de/4499-5>
- in Papierform an
VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik
Fachbereich Fabrikplanung und -betrieb
Postfach 10 11 39
40002 Düsseldorf

| Inhalt | Seite |
|--|-------|
| Vorbemerkung | 2 |
| Einleitung | 2 |
| 1 Anwendungsbereich | 3 |
| 1.1 Einsatzgebiete | 3 |
| 1.2 Bewertungs- und Beurteilungskriterien | 3 |
| 1.3 Zielsetzung | 4 |
| 1.4 Besonderheiten | 4 |
| 1.5 Problembereiche | 4 |
| 2 Normative Verweise | 4 |
| 3 Begriffe | 4 |
| 4 Grundlagen | 5 |
| 4.1 Belastungs-Beanspruchungs-Konzept | 5 |
| 4.2 Analyseobjekte | 6 |
| 4.3 Bewertungs- und Beurteilungsmodelle | 6 |
| 4.4 Rechtliche Rahmenbedingungen | 6 |
| 5 Analyse von Umgebungseinflüssen | 7 |
| 5.1 Arbeitsraum | 7 |
| 5.2 Raumlufte | 9 |
| 5.3 Mechanische Vibrationen | 17 |
| 5.4 Elektromagnetische Schwingungen | 26 |
| 6 Anwendungsbeispiele | 38 |
| 6.1 Prognose kombinierter Umgebungsbelastungen | 38 |
| 6.2 Weitere Visualisierung von Umgebungseinflüssen | 42 |
| 6.3 Resümee der Prognose von Umgebungseinflüssen | 43 |
| Schrifttum | 44 |

VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (GPL)

Fachbereich Fabrikplanung und -betrieb

Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen (www.vdi.de/richtlinien), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

An der Erarbeitung dieser Richtlinie waren beteiligt:

Dr. *Thomas Alexander*, Dortmund

Ingo Bömmels, Sankt Augustin

Dr.-Ing. *Bernd Brinkmeier*, Stuttgart

Peter Bröde, Dortmund

Kai Bürkle, Berlin

Hon.-Prof. Dr.-Ing. *Carmen Constantinescu*, Stuttgart

Dr. *Dusan Fiala*, Stuttgart

Dr. *Hansjürgen Gebhardt*, Wuppertal

Prof. Dr.-Ing. *Gunnar Grün*, Valley

Benjamin Illmann, Heidenau

Dr. *Martin Liedtke*, Sankt Augustin (stellvertretender Vorsitzender)

Jan Selzer, Sankt Augustin

Michael Spitzhahn, Chemnitz

Reinhard Stockmann, Sankt Augustin

Dr.-Ing. *Darko Sucic*, Stuttgart

Sarah Weiner, Valley

Dr.-Ing. *Stephan Wilhelm*, Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. *Gert Zülch*, Weingarten/Baden (Vorsitzender)

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Eine Liste der aktuell verfügbaren und in Bearbeitung befindlichen Blätter dieser Richtlinienreihe sowie gegebenenfalls zusätzliche Informationen sind im Internet abrufbar unter www.vdi.de/4499.

Einleitung

Diese Richtlinie befasst sich mit der Prognose von Belastungen und Beanspruchungen des arbeitenden Menschen durch Einflüsse aus der Arbeitsumgebung mittels Werkzeugen der Digitalen Fabrik. Sie ergänzt damit die Richtlinie VDI 4499 Blatt 4 dieser Richtlinienreihe, deren Inhalt analoge Effekte durch die Arbeitsaufgabe sind. Die behandelten Faktoren aus beiden Bereichen sind erforderlich, um die

daraus resultierenden Wirkungen auf den arbeitenden Menschen zu erfassen. Weitestgehend nicht behandelt werden in beiden Blättern die Wirkungen arbeitspsychologischer und -soziologischer Faktoren.

Für viele kombinierte Belastungsfaktoren trifft bislang zu, dass sie nicht die Wirkung auf den Menschen integrativ betrachten. Die vorliegende Richtlinie klammert daher verschiedene kombinierte Umgebungseinflüsse aus, obwohl z.B. die Abhängigkeit der Beanspruchung des arbeitenden Menschen durch körperliche Arbeit bei gleichzeitiger Hitzebelastung bekannt ist (siehe hierzu Abschnitt 4.2.1.8.2). Ähnliches gilt auch für andere Kombinationen von Belastungsfaktoren aus Arbeitsaufgabe und -umgebung (siehe Abschnitt 4.4.4.8).

Die beiden genannten Richtlinien bilden im Grundsatz ergonomische Phänomene im Bereich von Sekunden und Minuten ab. Demgegenüber betrachtet die Richtlinie VDI 3633 Blatt 6 das Bild des Personals in Simulationsmodellen und behandelt damit Effekte, die in Zeiträumen von Stunden bis hin zu Monaten prognostiziert werden können. Während VDI 4499 Blatt 4 auf realitätsnahe Darstellungen und Animationen des arbeitenden Menschen in einer Arbeitssituation gerichtet ist, verwendet die zuerst genannte Richtlinie zur Darstellung der Ergebnisse vornehmlich Geschäftsgrafiken.

Die vorliegende Richtlinie behandelt vorrangig in Deutschland verfügbare Werkzeuge und richtet sich an alle Akteure des Arbeitsschutzes und an weitere Interessierte. Zur ersten Gruppe gehören u.a. Planer von Arbeitssystemen, Fachleute für ergonomische Arbeitsgestaltung, Arbeitssicherheit, Betriebsärzte, Sicherheitsbeauftragte, Betriebsräte und Unternehmensleiter. Zur zweiten Gruppe zählen z.B. Experten, die mit der Weiterentwicklung von Werkzeugen der Digitalen Fabrik befasst sind.

Gliederung dieser Richtlinie

Im Anschluss an eine Benennung von Anwendungsbereichen und einzelner Begriffe wird nachfolgend auf wesentliche Konzepte zur ergonomischen Bewertung und Beurteilung eingegangen. Da für die Beurteilung die rechtlichen Bestimmungen maßgebend sind, werden diese zunächst im Überblick aufgeführt und später dann bei der Behandlung der hier betrachteten Umgebungseinflüsse detaillierter benannt.

Die Gliederung dieser Richtlinie orientiert sich an physikalischen Grundgrößen in der Arbeitsumgebung. Grundsätzlich wird dabei von einem umschlossenen Arbeitsraum ausgegangen, auf den dennoch äußere Umgebungseinflüsse, z.B. aus der

Atmosphäre, einwirken können. Die hier als wesentlich betrachteten Umgebungseinflüsse werden in die Gruppen Raum, Atemluft sowie mechanische und elektromagnetische Schwingungen eingeordnet.

Chemische und biologische Faktoren, die beim (taktilen oder ingestiven) Kontakt mit Arbeitsgegenständen und -stoffen auftreten können, werden im Grundsatz nicht behandelt. Insofern beschränkt sich deren Erörterung auf die Ausbreitung im Arbeitsraum durch physikalische Effekte. Weiterhin nicht behandelt werden künstliche optische Strahlen (außer der Beleuchtung), radioaktive Teilchenstrahlen (insbesondere durch Alpha-, Beta- oder Neutronenteilchen) sowie Unter- und Überdruck als Faktoren der Arbeitsumgebung. Gründe hierfür sind fehlende Prognosemethoden oder geringere praktische Relevanz im Vergleich zu den hier behandelten Umgebungseinflüssen.

Nur wenige der hier behandelten Umgebungseinflüsse sind bereits in umfassendere Verfahren der Digitalen Fabrik integriert worden oder modular integriert. Aufgrund dieses Stands der Technik werden auch nicht integrierte Softwareverfahren mit ihren grundlegenden Funktionalitäten angeführt. Zusätzlich werden zukünftige Möglichkeiten der Weiterentwicklung genannt.

1 Anwendungsbereich

1.1 Einsatzgebiete

In dieser Richtlinie werden Arbeitssysteme unter der Wirkung von Umgebungseinflüssen betrachtet. Dabei kann es sich sowohl um ein Mikroarbeitssystem (also um einen einzelnen Arbeitsplatz) als auch um ein Makroarbeitssystem (also komplexere räumliche Bereiche mit mehreren Arbeitsplätzen) handeln.

Entsprechend der Zweckbestimmung dieser Richtlinienreihe kann es sich um neu zu planende oder zu verbessernde Arbeitssysteme im Produktions- und Logistikbereich handeln. Grundsätzlich sind die hier erörterten Berechnungsmethoden und Softwareverfahren aber auch auf andere Arbeitssysteme (z.B. im Bürobereich) anwendbar.

Der Einsatz der hier behandelten Berechnungsmethoden und Softwareverfahren ist immer dann zu empfehlen, wenn eine Gefährdung des arbeitenden Menschen durch die aufgeführten Umgebungseinflüsse zu vermuten ist. Dies kann sowohl bei der Planung neuer als auch bei der Umgestaltung bestehender Arbeitsstätten der Fall sein. Durch die Anwendung der Verfahren werden Experimente in der Realität vermieden, die entweder unmöglich sind

oder eine Gefährdung der Versuchspersonen darstellen können.

Ein wichtiges Kriterium für die Güte der mit derartigen Berechnungsmethoden und Softwareverfahren ermittelten Prognosewerte ist deren Validität. Darunter ist hier die Übereinstimmung zwischen berechnetem Prognosewerte und realem Messwert zu verstehen. Diesbezüglich ist festzustellen, dass bislang nur vereinzelt Validierungsstudien vorliegen.

1.2 Bewertungs- und Beurteilungskriterien

Nachfolgend wird zwischen der Bewertung und der Beurteilung von umgebungsbezogenen Sachverhalten unterschieden. Die hier behandelten Berechnungsmethoden und Softwareverfahren liefern Prognosewerte und stellen im Sinne dieser Richtlinie eine Bewertung der Arbeitssituation dar. Die dazu verwendeten Bewertungskriterien werden bei der Erläuterung der einzelnen Umgebungsfaktoren aufgeführt.

Die Beurteilung sagt etwas über die Güte einer Bewertung im Hinblick auf den arbeitenden Menschen in einer bestimmten Arbeitssituation aus. In der Regel liegen hierfür Grenzwerte vor, die nicht über- oder unterschritten werden dürfen. Für einzelne Umgebungsfaktoren gibt es darüber hinaus Zwischenstufen, z.B. Komfortwerte und Auslösewerte für bestimmte Arbeitsschutz- oder Vorsorgemaßnahmen.

Hierzu kann das arbeitswissenschaftliche Ebenenschema nach *Kirchner* [1] und *Rohmert* ([2], S. 17) herangezogen werden. Es unterscheidet die Ebenen „Ausführbarkeit“, „Erträglichkeit“, „Zumutbarkeit“ und „Zufriedenheit“. Ausführbarkeit sagt aus, ob eine Tätigkeit in einer gegebenen Arbeitssituation überhaupt durchgeführt werden kann. Erträglichkeit liegt dann vor, wenn „die Arbeit über die Dauer des Berufslebens bei gegebener täglicher Arbeitszeit sowie Pausen- und Urlaubsregelungen ohne Beeinträchtigung der körperlichen und geistigen Gesundheit ausgeführt werden kann“ ([3], S. 63 f.). „In die Zumutbarkeit gehen vor allem kollektive Normen (z.B. gesetzlicher und tarifvertraglicher Art) ein“ ([3], S. 64). Zumutbarkeit betrifft schließlich die Einschätzung der Arbeitssituation durch eine einzelne Person.

Bei einzelnen Umgebungseinflüssen (vor allem beim Raumklima) werden zusätzlich Grenzwerte für (Dis-)Komfort angeführt. Derartige Grenzwerte lassen sich nur sehr aufwendig oder gar nicht bestimmen. Ähnliches trifft in der Regel für Leistungsbeeinträchtigungen sowie für mehrstufige Bereiche einer Gefährdung zu. Des Weiteren gilt dies auch für die Prognose von Risiken im Sinne des Arbeits- und Gesundheitsschutzes (VDI 4499 Blatt 4).

1.3 Zielsetzung

Primäres Ziel der Arbeitsumgebungsgestaltung ist die Sicherstellung von Arbeit, deren Belastung keine Gefahr für die Gesundheit darstellt. Neben der Umsetzung rechtlicher Vorschriften soll die Integration physikalischer Einflüsse in die Digitale Fabrik jedoch auch die Möglichkeit bieten, über geforderte Mindeststandards hinaus bereits in der Planungsphase Einwirkungen aus der Arbeitsumgebung zu berücksichtigen, um so nachträgliche korrektive Maßnahmen zu vermeiden.

Das Streben nach möglichst guten Bedingungen der Arbeitsumgebung lässt sich damit begründen, dass dadurch nicht nur Schädigungslosigkeit (siehe das Ebenenschema der ergonomischen Beurteilung von Arbeitssystemen nach *Schlick, Bruder* und *Luczak* ([3], S. 63 ff.) sichergestellt werden kann, sondern auch Aspekte menschlicher Leistung und Wohlbefindens ([4]; DIN EN ISO 26800) vorteilhaft beeinflusst werden können.

Eine Möglichkeit zur Systematisierung rechtlicher Grundlagen stellt der Bezug auf einzelne Arbeitsumgebungsarten dar. Die Erkenntnis, dass sich überlagernde Belastungsfaktoren aus der Arbeitsumgebung oftmals in ihrer Wirkung auf den Menschen ändern und teils verstärken, legt jedoch nahe, dass eine multifaktoriell ausgerichtete Sichtweise punktuellen Gestaltungsansätzen vorzuziehen ist. Die Komplexität der Umgebungsfaktoren bedingt allerdings Sachverständnis (z.B. durch die Forderung von Laserschutz- und Strahlenschutzbeauftragten nach § 5 OStrV oder §§ 43 bis 46 StrlSchV) sowie interdisziplinäre Zusammenarbeit.

1.4 Besonderheiten

Da Werkzeuge der Digitalen Fabrik vor allem bei der Planung von Arbeitssystemen eingesetzt werden, gelten hierfür die gesetzlichen Bestimmungen nach dem Betriebsverfassungsgesetz (BetrVG). So hat der Betriebsrat ein Unterrichtsrecht seitens des Arbeitgebers, das rechtzeitig vor der Realisierung einer Planungsmaßnahme erfolgen muss (§ 90 Abs. 1 BetrVG). Aber auch der einzelne Arbeitnehmer hat ein derartiges Unterrichtsrecht: „Der Arbeitgeber hat den Arbeitnehmer über die aufgrund einer Planung von technischen Anlagen, von Arbeitsverfahren und Arbeitsabläufen oder der Arbeitsplätze vorgesehenen Maßnahmen und ihre Auswirkungen auf seinen Arbeitsplatz, die Arbeitsumgebung sowie auf Inhalt und Art seiner Tätigkeit zu unterrichten“ (§ 81 Abs. 4 BetrVG).

Da sich im vorliegenden Zusammenhang das Arbeitssystem vielfach noch in der Planungsphase befindet, kommen Regelungen des Schutzes persönlicher Daten nach dem Bundesdatenschutzgesetz

(BDSG) nicht in Betracht (siehe auch DSGVO). Anders verhält es sich bei einer prognostizierenden Ermittlung von Umgebungseinflüssen, bei der die betroffene Person bekannt oder auf diese geschlossen werden kann.

1.5 Problembereiche

Ein besonderes Problem der Umgebungsfaktoren besteht darin, dass sie kombiniert und in unterschiedlicher Zeitfolge vorliegen können. Dies bedeutet, dass sich die Arbeitssituation dann verstärkend, ausgleichend oder neutral auf den arbeitenden Menschen auswirken kann.

Diese Effekte sind nur in wenigen Fällen wissenschaftlich belegt. Erst recht werden sie noch nicht durch Werkzeuge der Digitalen Fabrik abgedeckt. Daher konzentriert sich diese Richtlinie auch nur auf die Prognose einzelner (separater) Umgebungsfaktoren.