

# **Selbststeuerung in der Intralogistik**

## ***Kognitive räumliche Repräsentationen für autonome Fahrzeuge***

Arne Schuldt und Björn Gottfried,  
Technologie-Zentrum Informatik (TZI), Universität Bremen

**Vor dem Hintergrund sich schnell ändernder Anforderungen einer globalisierten Wirtschaft ist die flexible Anpassungsfähigkeit eine der Herausforderungen bei der Planung und Steuerung von Prozessen in der Produktions- und Transportlogistik. Ein vielversprechender Ansatz sowohl zur Reduzierung der Komplexität, als auch zur flexiblen Behandlung dynamischer Prozesse in der Logistik besteht in ihrer Selbststeuerung [2]. Statt einer zentralen Steuerung zielt dieses Paradigma darauf ab, die einzelnen logistischen Objekte mit der notwendigen Intelligenz für eine dezentrale Steuerung auszustatten. Hierzu werden Softwareagenten eingesetzt, die als Repräsentanten von Logistikobjekten in deren Auftrag handeln. Ein prominentes Beispiel sind Seecontainer, die nach ihrer Ankunft im Zielhafen die Disposition im Containernachlauf selbstständig vornehmen. Da alle notwendigen Informationen lokal vorhanden sind, kann schnell und flexibel auf unvorhergesehene Ereignisse, wie beispielsweise Verspätungen, reagiert werden, ohne dass eine komplette Neuplanung erforderlich ist.**

Ein spezielles Teilgebiet der Selbststeuerung logistischer Prozesse beschäftigt sich mit autonomen Fahrzeugen. Im oben beschriebenen Szenario findet lediglich die Prozesssteuerung durch Softwareagenten statt, d.h. dass der physische Transport und Umschlag der Seecontainer weiterhin von Menschen vorgenommen wird. Im Gegensatz dazu interagieren autonome Fahrzeuge direkt mit der realen Welt, in der sie sich fahrerlos bewegen. Fahrerlose Transportfahrzeuge werden seit den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts in der Intralogistik eingesetzt [4], beispielsweise um Werkstücke zwischen verschiedenen Arbeitsplätzen zu transportieren. Die Führung der Fahrzeuge kann anhand von Leitlinien im oder auf dem Boden erfolgen (mechanisch, magnetisch, induktiv oder optisch). Durch die Notwendigkeit der Verlegung von Schienen oder Induktionsdrähten im Boden ist die Flexibilität dieses Verfahrens bei Änderungen des Produktionslayouts jedoch stark eingeschränkt [5]. Eine Alternative stellt der Einsatz von Methoden der Bildverarbeitung dar. Hierbei werden Bilder, die mittels einer Kamera oder eines Lasers zur Entfernungsmessung erfasst werden, zur Navigation mit zuvor gespeicherten Bildern verglichen [4]. Allerdings ist auch diese Herangehensweise eingeschränkt hinsichtlich der Reaktion auf Veränderungen der Umgebung oder Veränderungen in der Umgebung, beispielsweise hervorgerufen durch das unvorhergesehene Erscheinen von Menschen oder anderer Fahrzeuge.

Im Gegensatz zu autonomen Fahrzeugen fällt es Menschen im Allgemeinen leicht, in dynamischen Umgebungen zu navigieren. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, bei der Steuerung autonomer Fahrzeuge auf eine kognitiv angemessene Repräsentation der Umgebung zurückzugreifen. Dieser Artikel beschreibt einen Ansatz aus dem Gebiet des qualitativen räumlichen Schließens [1], einem Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz. Basierend auf kognitionswissenschaftlichen Grundlagen ermöglicht es dieser Ansatz, durch die Kooperation autonomer Fahrzeuge, unvollständiges Wissen über die Umgebung zu vervollständigen und ungenaues Wissen geeignet zu handhaben.

### ***Navigation in der Intralogistik***

Die Navigation selbststeuernder Fahrzeuge stellt eine große Herausforderung dar. Wie eingangs ausgeführt, schränkt das Verlegen von Schienen oder Induktionsdrähten im Boden die

Flexibilität ein, da Änderungen am Produktionslayout nur mit erheblichem Aufwand vorgenommen werden können. Auch das Auftragen von Leitlinien auf den Boden ist problematisch, da diese Verschleiß und Verschmutzung durch Fahrzeuge und Materialien ausgesetzt sind [4]. Die Flexibilität kann durch den Einsatz bildverarbeitender Methoden erhöht werden, indem Aufnahmen der Umgebung mit zuvor gespeicherten Bildern verglichen werden. Durch die Abhängigkeit von vorhergehenden Aufnahmen der Umgebung sind jedoch die Reaktionsmöglichkeiten bei Veränderungen der Umgebung eingeschränkt. Ein Beispiel für derartige Veränderungen stellen Paletten dar, die von einem anderen Transportfahrzeug in einem Gang platziert werden. Dadurch dass diese Paletten die Sicht auf die Umgebung einschränken, verändert sich die durch das autonome Fahrzeug wahrgenommene Szene. Der Vergleich mit einem zuvor gespeicherten Bild würde zu keiner Übereinstimmung mehr führen, so dass das Fahrzeug sich nicht mehr lokalisieren könnte. Ein weiteres Problem dieses Verfahrens ist, dass das Fahrzeug nicht in der Lage wäre, das aufgetretene Hindernis zu umfahren. Dies liegt darin begründet, dass dem Fahrzeug ausschließlich ein quantitatives Abbild seiner Umwelt vorliegt: Bei einem mit einer digitalen Kamera aufgenommenen Foto handelt es sich um eine zweidimensionale Matrix von Farbwerten. Diese Daten reichen zum Vergleich mit bekannten Bildern aus. Das Erkennen von Objekten ist hingegen nicht ohne weiteres möglich. Ohne jedoch ein Objekt und seine Eigenschaften, wie etwa seine Ausmaße, zu erkennen, ist es nicht möglich, dieses kollisionsfrei zu umfahren.

Die menschliche Wahrnehmung basiert ebenfalls auf dem quantitativen Abbild der Umgebung, das auf die Netzhaut projiziert wird. Von dieser zugrunde liegenden Repräsentation abstrahiert die Wahrnehmung jedoch. So sind Menschen nicht in der Lage, Farbwerte exakt zu bestimmen. Stattdessen werden einzelne Objekte erkannt und Beziehungen zwischen ihnen wahrgenommen. Menschliche Betrachter können im Allgemeinen klar unterscheiden, ob sich ein Objekt links oder rechts von einem anderen befindet. Auf Grundlage dieser kognitiven Fähigkeit können Menschen bereits ohne Schwierigkeiten viele Navigationsprobleme in ihrer Umgebung lösen. Daher erscheint der Ansatz vielversprechend, eine derart kognitiv motivierte Abstraktion ebenfalls für autonome Fahrzeuge umzusetzen.

Für die Wahrnehmung der Umgebung existieren zwei mögliche Herangehensweisen. Zum einen kann die Umgebung durch in der Produktionshalle angebrachte Kameras aufgenommen werden. Eine einzelne Kamera wird dabei im Allgemeinen nicht in der Lage sein, sämtliche Winkel des Gebäudes zu registrieren. Eventuell unvollständiges Wissen aus einer Perspektive muss daher durch Wissen anderer Kameras vervollständigt werden können. Alternativ können auch die autonomen Fahrzeuge selbst mit Kameras ausgestattet werden. In diesem Fall ist die Kooperation mehrerer Fahrzeuge erforderlich, um unvollständiges Wissen aus dem Sichtfeld einzelner Fahrzeuge durch Kombination zu vervollständigen. Gegenüber der stationären Montage ermöglicht das Mitführen der Kamera auch das Befahren großer Areale, wie beispielsweise Container Terminals, die andernfalls nicht flächendeckend beobachtet werden könnten. Abhängig von der Anzahl der autonomen Fahrzeuge und der Größe des zu bedienenden Areals kann die Anzahl der benötigten Kameras dadurch deutlich reduziert werden. Insofern stellt ein Ansatz, der auch den Einsatz mobiler Kameras ermöglicht, einen erheblichen Vorteil dar.

Im Folgenden werden beispielhaft zwei Probleme bei der Navigation autonomer Fahrzeuge vorgestellt, eines aus Sicht stationärer, eines aus Sicht mobiler Kameras. Bild 1 zeigt ein Regal in einem Lager. Auf beiden Seiten des Regals befindet sich eine stationäre Kamera, die den Raum jeweils nur auf der ihr zugewandten Seite des Regals überblicken kann. Von beiden Seiten nähert sich ein autonomer Gabelstapler. Da jede Kamera jeweils nur den Stapler auf ihrer Seite des Regals wahrnimmt, müssen die Kameras sich austauschen, um herauszufinden, ob eine Kollision droht. Bild 2 stellt ein Szenario von autonomen Staplern dar, die mit mobilen Kameras ausgestattet sind. In jeder der drei Regalgassen befindet sich ein Gabelstapler  $y_1$ ,  $y_2$  beziehungsweise  $y_3$ . Die Stapler  $x_1$ ,  $x_2$  und  $x_3$  wollen in jeweils eine dieser Gassen einfahren

und müssen dazu herausfinden, ob eine Kollision mit den sich bereits in den Gassen befindlichen Staplern droht.

### **Qualitatives Räumliches Schließen**

Ein menschlicher Betrachter ist neben dem Wahrnehmen einzelner Objekte vor allem dazu in der Lage, Beziehungen zwischen ihnen zu erkennen. Dabei werden im Allgemeinen keine quantitativen Größenunterschiede erkannt. Ein Mensch ist also im Allgemeinen nicht ohne Hilfsmittel in der Lage festzustellen, dass zwei Objekte exakt zehn Meter voneinander entfernt sind; dies gilt ebenso für exakte Winkel. Stattdessen kann hingegen klar unterschieden werden, ob sich ein Objekt rechts oder links, vor oder hinter einem anderen befindet. Trotz der recht groben Auflösung einer Repräsentation, die auf solchen Unterschieden basiert, lassen sich Szenen dennoch hinreichend genau beschreiben, um beispielsweise aus der Kombination mehrerer Blickwinkel bisher unbekanntes Wissen abzuleiten: Verschiedene unvollständige Blickwinkel addieren sich zu einer vollständigen Szenenbeschreibung. Um ihnen das Erkennen ihrer Umgebung zu ermöglichen, soll diese kognitive Leistung auch autonomen Fahrzeugen ermöglicht werden. Hierzu werden die so genannten *Bipartite Arrangement* [3] Relationen, kurz  $BA_{23}$ , eingesetzt.

Durch jedes Objekt wird dazu entlang seiner Hauptachse ein Vektor gelegt. Wie in Bild 3 dargestellt, wird die Umgebung durch drei Hilfslinien in sechs Sektoren eingeteilt [6], weshalb dieses Objekt auch als Referenzobjekt bezeichnet wird. Eine der Hilfslinien verläuft direkt durch den Vektor. Sie erlaubt die Unterscheidung, ob sich ein anderes Objekt links oder rechts vom Referenzobjekt befindet. Wie bereits ausgeführt, handelt es sich dabei um eine Unterscheidung, die auch ein Mensch im Allgemeinen klar treffen kann. Die anderen beiden Hilfslinien verlaufen senkrecht zur ersten durch den Anfangs- beziehungsweise Endpunkt des Vektors. Diese erlauben die Unterscheidung, ob sich ein Objekt vor, neben oder hinter dem Referenzobjekt befindet. Jeder Punkt kann sich somit relativ zum Referenzobjekt in einem der sechs Sektoren befinden. Da alle Objekte durch einen Vektor, also einen Anfangs- und Endpunkt, beschrieben sind, ergeben sich insgesamt  $6^2=36$  mögliche Anordnungen von zwei Objekten relativ zueinander. Durch das Auslassen von Überschneidungen (zwei Objekte können nicht dieselbe Position im Raum annehmen) und das Ausnutzen von Symmetrien, lassen sich die möglichen Konfigurationen auf die 23 in Bild 3 dargestellten reduzieren [3]. Mnemonische Bezeichnungen für die einzelnen qualitativen Relationen, die ihrer Kommunikation dienen, sind in Bild 3 rechts dargestellt. Eine Palette, die sich beispielsweise links neben einem Gabelstapler befindet, wäre demnach durch die Relation  $D_l$  (d.h. „during left“) gekennzeichnet.

Um dieses Verfahren einzusetzen, ist es zunächst erforderlich, die wahrgenommenen Objekte entsprechend zu Vektoren zu abstrahieren. Dabei ist der Ansatz unabhängig vom konkret eingesetzten bildgebenden Verfahren. So können beispielsweise Objekte durch optische Markierungen erkannt werden. Eine derartige Markierung ist im Vergleich zu Linienführungen auf dem Hallenboden insofern unproblematischer, als dass sie Verschleiß und Verschmutzung deutlich weniger ausgesetzt sind. Um diese Einflüsse weiter auszuschließen sind beispielsweise auch auf Funksendern basierende Verfahren denkbar. Ein gewähltes Verfahren muss nur die Möglichkeit bieten, Objekte in der Umgebung des autonomen Fahrzeugs sowie ihre Bewegungsrichtung zu erkennen. Wie bereits diskutiert, ist es für einige Aufgaben darüber hinaus erforderlich zu erkennen, um welche Objektklasse es sich handelt, also ob beispielsweise ein Stapler oder eine Palette wahrgenommen werden. Darüber hinaus ist zusätzlich auch das Wiedererkennen bestimmter Objekte erforderlich, ob es sich also beispielsweise um denselben Stapler handelt, den ein Fahrzeug bereits vor einer Minute an anderer Stelle registriert hat. Hierzu ist ebenfalls eine optische Kennzeichnung der Fahrzeuge und Objekte denkbar. Abhängig von der Anzahl der zu identifizierenden Objekte müssen allerdings gegebenenfalls sehr viele unterschiedliche Erkennungszeichen eingeführt werden. Die hierzu notwendi-

gen Unterscheidungen können im praktischen Einsatz allerdings durch Verschleiß und Verschmutzung erschwert werden. Daher ist für diese Anwendung die Identifikation mittels RFID vorzuziehen.

### **Fallstudie: Autonome Stapler**

Die im vorherigen Absatz eingeführte Methode aus dem Bereich des qualitativen räumlichen Schließens soll nun auf die in Bild 1 und 2 illustrierten Navigationsprobleme angewendet werden. In Bild 1 befindet sich das Regal  $y$  auf der rechten Seite des Staplers  $x$ ; bezogen auf  $z$  ist das Regal auf der linken Seite. Jede dieser Informationen kann jeweils nur durch eine der beiden stationären Kameras wahrgenommen werden. Durch die Kombination beider Wahrnehmungen lässt sich feststellen, dass beide Stapler in dieselbe Richtung fahren. Beim Umfahren des Regals ist also Vorsicht geboten, um eine Kollision zu vermeiden. In diesem Beispiel werden Informationen aus der mit (Kamera-)Sensoren ausgestatteten Umgebung gewonnen und zentral verrechnet (stationäre Kameras). Die Stapler werden über Gefahren informiert und empfangen Navigationsbefehle von der Umgebung.

Bild 2 stellt sechs Stapler dar, die sich entweder in einer Regalgasse befinden oder diese befahren möchten. In Bild 2 links befindet sich Stapler  $y_1$  vorne links von  $x_1$  (d.h. „ $F_l$ “),  $x_1$  wiederum ist hinten rechts von  $y_1$  (d.h. „ $B_r$ “). Aus dieser Information kann geschlossen werden, dass sich beide in dieselbe Richtung bewegen, eine Kollision also nicht zu befürchten ist. In der Mitte von Bild 2 befindet sich  $y_2$  ebenfalls vorne links von  $x_2$ . Im Vergleich zu  $y_1$  ist  $y_2$  um  $180^\circ$  gedreht. Aus diesem Grund ist die Position von  $x_2$  aus Sicht von  $y_2$  ebenfalls vorne links. Da beide Gabelstapler aufeinanderzufahren, darf  $x_2$ , um eine Kollision zu vermeiden, die Regalgasse nicht befahren. In Bild 2 rechts befindet sich Stapler  $y_3$  vorne vor  $x_3$  (d.h. „ $F_m$ “). Stapler  $x_3$  ist aus Sicht von  $y_3$  links neben ihm (d.h. „ $D_l$ “). Daraus kann geschlossen werden, dass  $y_3$  gerade Waren aus dem Regal entnimmt. In diesem Fall darf  $x_3$  die Regalgasse befahren,  $y_3$  muss die Gasse entsprechend in die andere Richtung verlassen. Im Gegensatz zum ersten Beispiel werden in den letzten drei Fällen Informationen dezentral durch die mit entsprechender Sensorik ausgestatteten Stapler gesammelt und verarbeitet (mobile Kameras). Zu diesem Zweck kommunizieren die Stapler untereinander, d.h. tauschen Informationen über ihre Lage aus (in der  $BA_{23}$ -Sprache).

### **Fazit und Ausblick**

Die obigen Beispiele zeigen, wie sich aus der kognitiv adäquaten Repräsentation der Umwelt unmittelbar und einfach Schlüsse zur Steuerung autonomer Fahrzeuge ableiten lassen. Trotz der Vergrößerung der qualitativen Repräsentation von den zugrundeliegenden quantitativen Daten lassen sich relevante Situationen klar unterscheiden. Die diskutierten Beispiele zeigen, dass der Einsatz dieses Verfahrens sowohl für stationäre als auch für mobile Kameras möglich ist. Damit ergeben sich zahlreiche Einsatzmöglichkeiten, die über die Fabrikhalle hinausgehen. So ist beispielsweise auch die Steuerung autonomer Fahrzeuge im Außenbereich, etwa in Containerterminals, denkbar.

### **Literatur**

- [1] Cohn, A.G., Hazarika, S.M.: Qualitative Spatial Representation and Reasoning: An Overview. *Fundamenta Informaticae* 43 (2001) 2–32
- [2] Freitag, M., Herzog, O., Scholz-Reiter, B.: Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen. *Industrie Management* 20(1) (2004) 23–27
- [3] Gottfried, B.: Reasoning about Intervals in Two Dimensions. In Thissen, W., Wieringa, P., Pantic, M., Ludema, M., eds.: *IEEE SMC 2004*, The Hague, The Netherlands, IEEE Press (2004) 5324–5332
- [4] ten Hompel, M., Schmidt, T., Nagel, L., Jünemann, R.: *Materialflusssysteme – Förder- und Lagertechnik*. Springer (2007)

- [5] Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik – Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik. Vieweg (2006)
- [6] Zimmermann, K., Freksa, C.: Qualitative Spatial Reasoning Using Orientation, Distance, and Path Knowledge. Applied Intelligence 6 (1996) 49–58

### **Schlüsselwörter**

Logistik, Autonome Fahrzeuge, Qualitatives Räumliches Schließen, Kognition, Kooperation

### **Autonomous Control in Intralogistics Cognitive Spatial Representations for Autonomous Vehicles**

Autonomous vehicles are employed in intralogistics in order to transport workpieces between different workplaces. Previous guidance systems are based on wire-guided tracks or optical following of surface markings. In the first case, the possibility to change the production layout is rather limited. In the second case, abrasion can significantly decrease recognition rates. By contrast, humans easily succeed in navigation tasks, even in dynamic environments. A promising approach is therefore to apply a cognitively motivated spatial representation for autonomous vehicles. This article presents  $BA_{23}$ , a set of 23 qualitative relations for qualitative spatial reasoning, and discusses its application in intralogistics.

### **Keywords**

Logistics, Autonomous Vehicles, Qualitative Spatial Reasoning, Cognition, Cooperation

**Dipl. Inf. Arne Schuldt** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Bereichs „Intelligente Systeme“ im Technologie-Zentrum Informatik (TZI) der Universität Bremen. Er ist Stipendiat der International Graduate School for Dynamics in Logistics.

**Dr.-Ing. Björn Gottfried** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Bereichs „Digitale Medien“ im Technologie-Zentrum Informatik (TZI) der Universität Bremen. Er hat auf dem Gebiet des räumlichen Schließens zahlreiche Journal- und Konferenzbeiträge veröffentlicht und ist Mitveranstalter verschiedener Workshops auf diesem Gebiet.

### **Kontakt**

Technologie-Zentrum Informatik (TZI)  
Universität Bremen  
Am Fallturm 1  
D-28359 Bremen  
Tel.: 0421 / 218-8176  
Fax: 0421 / 218-7196  
E-Mail: [as@tzi.de](mailto:as@tzi.de)  
URL: <http://www.tzi.de>

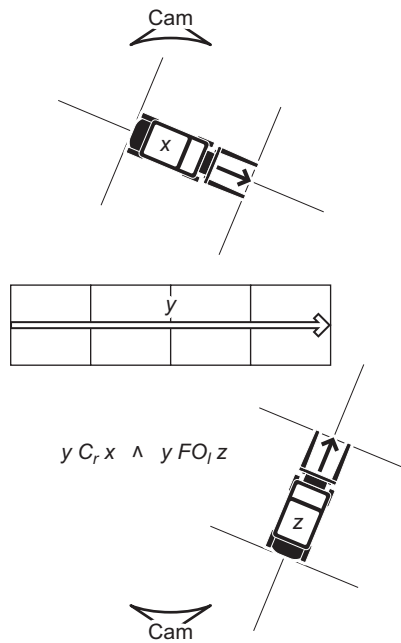


Bild 1: Jede Kamera kann nur die Hälfte der Szene sehen. Erst durch die Kombination ihres Wissens ist erkennbar, dass eine Kollision droht.

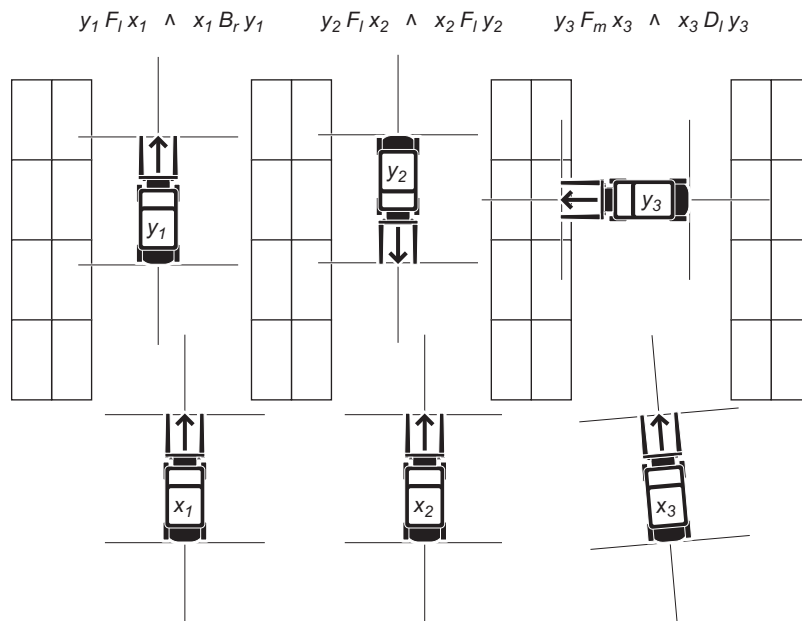


Bild 2: Drei Regalgassen, in denen sich jeweils ein Stapler befindet. Ob ein zweiter Stapler in die Gasse einfahren kann, lässt sich anhand der  $BA_{2,3}$ -Relationen bestimmen.

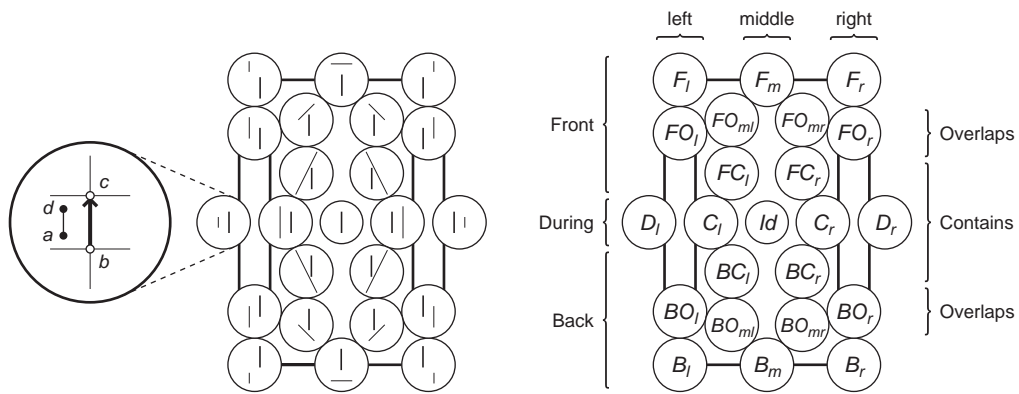


Bild 3: Beispielanordnung der  $BA_{23}$ -Relationen (links), die hervorgehobene Konfiguration beschreibt, wie zwei Vektoren zueinander in Relation gesetzt werden. Für jede Konfiguration gibt es eine mnemonische Bezeichnung (rechts).