

Maria Hennes, Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe

Flächenerfassung mit Lasertrackern als Alternative zu scannenden Verfahren

1 Motivation

Flächenerfassungen sind sowohl für Reverse Engineering als auch für Prüf- und Justieraufgaben erforderlich. Im industriellen Bereich liegen die Genauigkeitsforderungen oftmals im Hundertstelmillimeterbereich. Weil die Objektvolumina zunehmend anwachsen, sind typische flächenbasierte Verfahren basierend auf Nahbereichsscannern und ähnlichem zunehmend ungeeignet. Außerdem erfüllen terrestrische Scanner die Genauigkeitsforderungen bei weitem nicht. Hinzu kommen oberflächenabhängige Reflexionseigenschaften, die zur Genauigkeitseinbuße bei scannenden Verfahren führen. In manchen Aufgabenstellungen ist neben dem großen Messvolumen auch die Adaption an punktförmig vorgegebenen Objektinformationen (Bohrungen, Passkegel etc.) erforderlich. Weil Lasertracker sowohl diese Adaption leicht ermöglichen, als auch eine geringe Unsicherheit und eine sehr große Reichweite aufweisen, liegt es nahe, die Leistungsfähigkeit dieser Systeme zur Flächenrückführung zu analysieren.

2 Alternative Messverfahren

Photogrammetrische Verfahren bestechen durch ihre hohe Messgeschwindigkeit bei geringer Messunsicherheit. Allerdings muss das Objekt eine strukturierte Oberfläche aufweisen oder es muss mit geeigneten Mitteln eine Strukturierung erzeugt werden. Das Arbeitsvolumen eines einzigen Bildpaares kann durch Bündellösungen erweitert werden, was aufwändig wird, wenn nicht durchgängig, sondern nur an einigen Objektbereichen lokal flächenhafte Information erforderlich wird.

Zum unmittelbaren Scannen in einem großen Messvolumen (60 m) bietet sich das Laserradar an, das ähnlich einem reflektorlosen Tachymeter aufgebaut ist, aber über eine schnelle (2 ms) und hochgenaue (25 μm , 2 σ) Distanzmessung verfügt. Trotzdem wird der Scanvorgang langsam, weil das Fokusmanagement erst diese hohe Genauigkeit garantiert und die Punktmessdatenrate auf 0.5 Hz reduziert. Überdies ist das Instrument so kostenaufwändig, dass es sehr selten kommerziell eingesetzt wird.

Demgegenüber besitzen Triangulationsscanner höhere Messraten (einige Millionen Punkte in wenigen Sekunden) bei hoher Genauigkeit. Die Auflösung in Tiefenrichtung kann bis zu wenigen μm betragen. Allerdings ist das Messvolumen äußerst begrenzt (wenige dm bis 3 m Arbeitsabstand, in Abhängigkeit vom gewählten Objektiv). Oftmals werden kleine Objekte vor dem Scanner rotatorisch bewegt, um in mehreren Aufnahmen eine allseitige Erfassung zu erlauben. Überlappende Aufnahmen aus unterschiedlichen Positionen lassen sich durch Matchen der Punktwolken zusammenfügen, was aber über lang gestreckte Objekte zu Genauigkeitsverlusten führen wird. Deswegen sind Verfahren, bei denen die Position und Orientierung des Scanners übergeordnet bestimmt wird, bei großen Objekten vorteilhafter. Zur Scannerpositionierung können Messarme und optische 6-DOF-Systeme (K-Serie, T-Scan) dienen, die aber die Systemkosten erheblich vergrößern.

3 Potential von Lasertrackern

Lasertracker weisen als optische 3D-Messsysteme eine typische Messunsicherheit von 10 ppm (2σ) auf. Für einen Leica-LTD 500 konnte bestätigt werden, dass die Unsicherheit interferometrisch gemessener Distanzen etwa 1 ppm beträgt, wobei der größte Einfluss in der repräsentativen Erfassung der meteorologischen Parameter liegt. Diese Genauigkeit entspricht in etwa den Triangulationsscannern in Tiefenrichtung, wobei jedoch der Lasertrackermessbereich um ein Vielfaches auf 35 m erweitert ist. Weil die Richtungserfassung den limitierenden Faktor darstellt [Juretzko, 2007], bietet es sich an, die zu vermessende Fläche senkrecht zur Strahlrichtung auszurichten. Wegen des einzelpunktbezogenen Messverfahrens wird bei der Vernetzung verschiedener Standpunkte kaum Genauigkeit eingebüsst. Flächen müssen mit Lasertrackern nicht zwingend als einzeln gemessene Punkte erfasst werden, weil der kinematische Messmodus die kontinuierliche Erfassung (mit vorgebbaren Raum- oder Zeitschritten) erlaubt. Die Genauigkeit hierfür spezifiziert Leica mit 40 ppm (2σ), wobei keine Angaben gemacht werden, wie sich die Genauigkeit auf die einzelnen Elemente der 4D-Koordinate verteilt. Erste Untersuchungen am Geodätischen Institut zeigen jedoch, dass die Relativgenauigkeit in einem kleinen Messbereich deutlich höher liegt (über 120 mm etwa $2\mu\text{m}$ je Koordinate, etwa 12 ppm (2σ) entsprechend; über 1 m etwa $2\mu\text{m}$ in Tiefenrichtung und $15\mu\text{m}$ quer, entsprechend max. 6 ppm (2σ))¹ Wegen der Datenrate von 1000 Hz (intern 3000 Hz) übersteigt der Lasertracker die Datenerfassungsrate eines Laserradars bei gleicher Genauigkeitsstufe um ein Vielfaches.



Abbildung 1: Reflektoren (Corner Cube Reflector CCR)

Im Gegensatz zum Laserradar muss mit einem Lasertracker die zu vermessende Oberfläche angetastet werden. Hierzu werden Reflektoren in kugelförmigen Stahlgehäusen verwendet (vgl. Abbildung 1). Der Vorteil, interessante (detailreiche) Bereiche sofort beim Messvorgang durch die Führung des Reflektors selektieren zu können, muss von Fall zu Fall gegenüber dem gleichmäßigen Punktraster eines Scans (durch Laserradar) abgewogen werden. Das Laserradar bietet zwar durch spezielle Algorithmen die genauigkeitsoptimierte Vermessung von Regelgeometrien (Passpunkten), jedoch ist auch hier wie bei allen scannenden Verfahren eine Nachbehandlung der Punktwolke mit allen Komplikationen (Kometenschweifproblematik etc.) notwendig. Demgegenüber gelingt mit dem Lasertracker unmittelbar die Einpassung in ein punktorientiertes Objekt(koordinaten)system. Die Verwendung eines Reflektors beim La-

¹ Für größere Messbereiche wird an der Trennung der Unsicherheit von Prüfmittel und Prüfling gearbeitet [Depenthal, 2007]

Im Fall a) gelingt eine a-posteriori-Berechnung immer, für eine online-Berechnung darf die lokale Krümmung einen bestimmten Wert nicht übersteigen, der von der Punktdichte, der Messgenauigkeit und der zugelassenen Modellabweichung abhängig ist [Hennes, 2006]. Üblicherweise unterstützen die Datenerfassungsprogramme für Lasertracker die Berechnung von Regelflächen und somit Fall b): Vermutet man lediglich geringe Abweichungen der zu erfassenden Fläche von einer Regelfläche, kann diese zuvor durch die Aufnahme einiger weniger markanter Punkte approximativ erfasst werden und als Grundlage für die Berechnung der Reflektoroffsetkorrektur geeignet sein. Generell sollte allerdings durch eine Vorabschätzung geklärt werden, welche Modellunsicherheiten zu erwarten und in welcher Weise bzw. wie detailliert die Regelflächen zu bestimmen sind. Eine Wölbung von lediglich 4 mm (2 Streichholz-dicken) unter einer als eben angenommenen Fläche von $30 \times 30 \text{ cm}^2$ erzeugt bereits Modellabweichungen bis zu $20 \mu\text{m}$, also in der Größenordnung der Messgenauigkeit, selbst wenn ein kleiner Reflektor ($0.5''$) verwendet wird. Die Abhängigkeit von der Höhe der Wölbung veranschaulicht Abbildung 3.

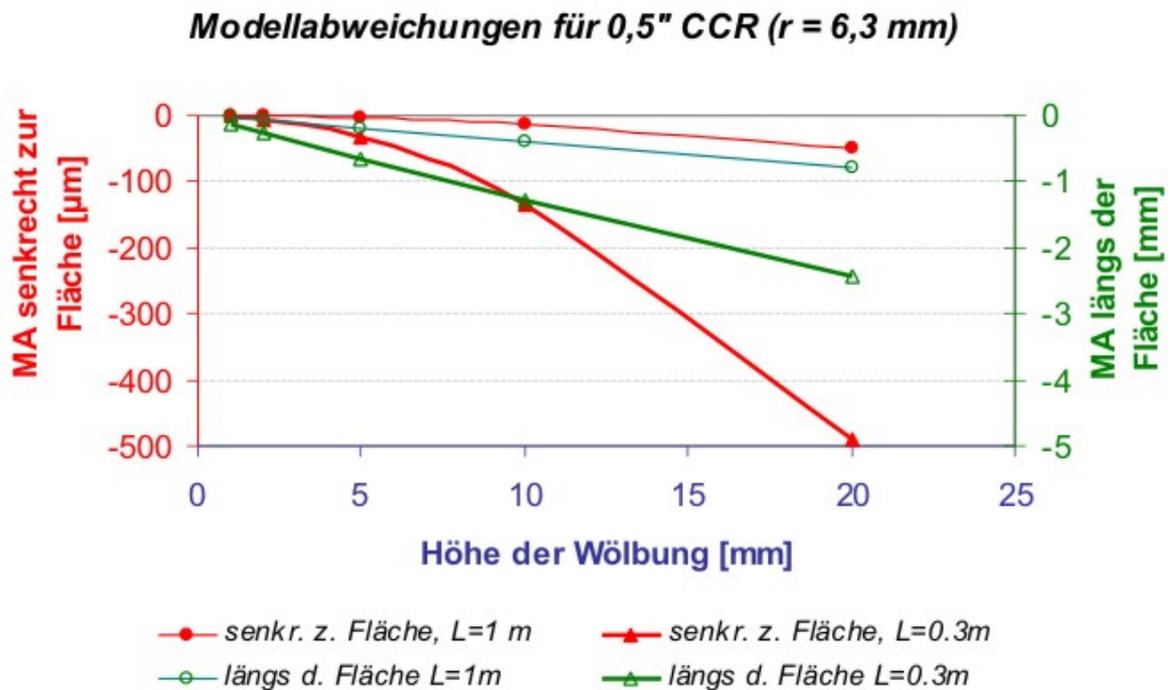


Abbildung 3: Modellabweichung durch Vernachlässigung einer Wölbung der Höhe h über eine Länge L bei der Berechnung der Flächennormalen

Gleiches gilt auch für Fall c), wobei nun zu entscheiden ist, welche Ausmaße Deformationen bzw. Umbauten am zu vermessenden Objekt vorgenommen worden sind. In diesem Fall muss natürlich das Beobachtungssystem (des Lasertrackers) bezüglich des CAD-Modells orientiert werden, was mit geeigneter Software unproblematisch ist, da viele SW-Pakete auch das Einlesen von CAD-Daten unterstützen [vgl. z.B. Runge, 2007].

Neben den Modellabweichungen beeinträchtigen die Fertigungstoleranzen des Reflektors das Messergebnis. Reflektoren hoher Güte sind mit einer Radiusabweichung von $\pm 2.5 \mu\text{m}$, einer Rundheitsabweichung von $\pm 1.5 \mu\text{m}$ und einer Zentriergenauigkeit von $\pm 6 \mu\text{m}$ spezifiziert. Je nach Objektorientierung und Messablauf gehen diese Unsicherheiten mit unterschiedlichem Einfluss in die Unsicherheit der Flächenbestimmung ein. Beispielsweise kann der Ein-

fluss der Zentriergenauigkeit unter $1.5 \mu\text{m}$ gehalten werden, wenn der Reflektor um nicht mehr als 15° bei der Messung verrollt wird.

5 Beispiel zur Flächenerfassung mit zusätzlicher Positionierinformation

Die Vorteile des Einsatzes eines Lasertrackers bei der Flächenrückführung veranschaulicht die Vermessung eines Compact Antenna Test Ranges (CATR). Ein solches Testfeld besteht aus zwei Zylinderparabolen und einem Einspeisemodul für das zu generierende Hochfrequenzfeld, die so angeordnet sind, dass die am Einspeisemodul austretenden Kugelwellen nach Reflexion am zweiten Zylinderparabol eine planare Wellenfront bilden. Hierzu müssen sowohl die Zylinderparabole (Spiegel) entsprechend geformt sein als auch ihre Anordnung in Bezug auf die Einspeisung der Brennweiten genügen (Abbildung 4). Es waren also die Abweichungen der Spiegel von der Sollform (jeweils gegeben durch die Brennweite) zu bestimmen, da der Auftraggeber die Fertigungsqualität der Zylinderparabole analysieren wollte.

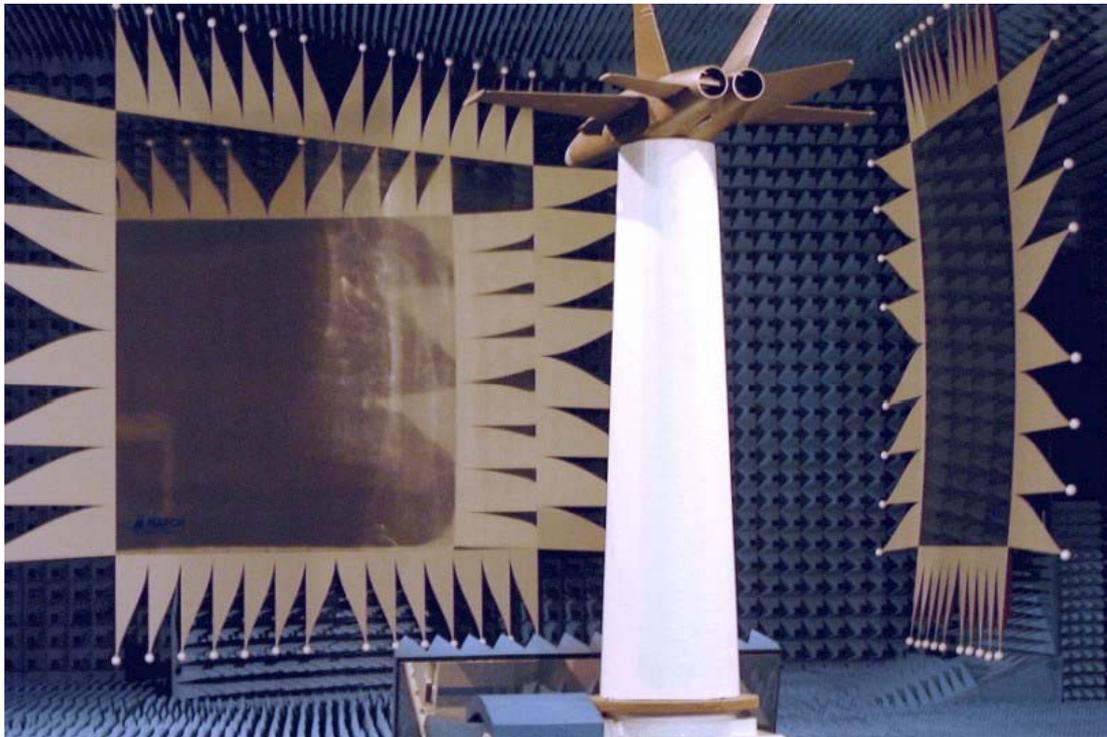


Abbildung 4: Anordnung der Zylinderparabole und Testobjekt im Fernfeld
(Einspeisung nicht dargestellt)

Die Vermessung konnte antastend geschehen, allerdings sollte ein linienhaftes Verfahren des Reflektors zur Vermeidung von Kratzern vermieden werden. Deswegen wurde mit Klebstreifen eine Matrix mit 11 (bzw. 15) Spalten und 9 Zeilen markiert. Beim Aufsetzen des Reflektors konnte bei manuell gehaltenem CCR eine 3D-Wiederholgenauigkeit von $20 \dots 30 \mu\text{m}$ realisiert werden, wobei der größte Anteil längs der Fläche entstand. Da bisher kein kommerzielles Messwerterfassungsprogramm über die Regelgeometrie „Zylinderparabol“ verfügt und das eingesetzte System weder den Import noch die Nutzung von CAD-Daten erlaubte, wurde mögliche Regelgeometrien untersucht, um vor Ort gleich mit korrigierten 3D-Daten arbeiten zu können. Für die Berechnung der Reflektoroffsetkorrektion führt die Approximation der –

sehr flachen – Zylinderparabole durch eine Ebene zu Modellfehlern von $150\ \mu\text{m}$. Erst ein Kreiszyylinder ist vertretbar, wenn er durch Punkte am Rand des Parabols gestützt wird (Modellabweichung wenige μm); die Stützung in den jeweils äußeren Dritteln führt mit $15\ \mu\text{m}$ bereits zu Modellabweichungen, die in der Größenordnung der Messgenauigkeit liegen. In Bezug auf die Konstruktionsdaten konnten Abweichungen gemäß Abbildung 5 links nachgewiesen werden.

Die beiden Spiegel wurden je zweimal vermessen, so dass aus dem Vergleich der resultierenden Flächen eine Wiederholgenauigkeit der Flächenbestimmung von $15\ \mu\text{m}$ abgeleitet werden konnte. Das am Geodätischen Institut erstellte Ausgleichungsprogramm für Zylinderparabole bietet die Möglichkeit der Berechnung des bestpassenden Zylinderparabols mit freier Brennweite. Für den Hersteller bzw. Auftraggeber war dies von besonderer Bedeutung, weil nun allein durch Brennweitenänderung (gleichbedeutend mit Abstandsänderung zwischen Parabol und Einspeisemodul bzw. zwischen den Parabolen) eine ausreichend gute Wellenfront realisiert werden und auf die mühselige Justierung von Paneelen verzichtet werden konnte. Die Restabweichungen bezüglich der neuen Zylinderparabolform sind in Abbildung 5 rechts dargestellt.

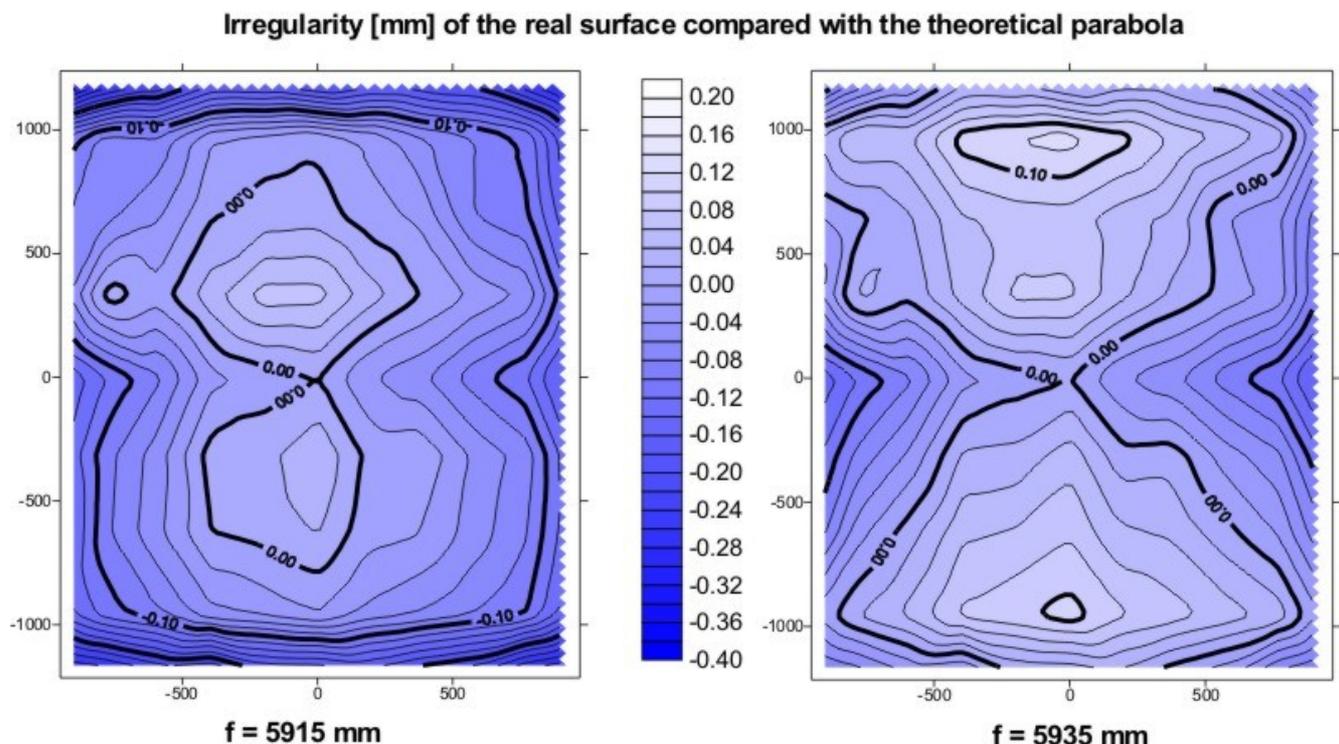


Abbildung 5: Abweichungen bezogen auf Konstruktionsdaten (links) und Abweichungen bei bestpassender Brennweite (rechts)

Für diese Aufgabe versagt ein scannendes Verfahren, weil die Reflektivität zu hoch ist und eine mattierende Beschichtung zu vermeiden war. Selbst wenn die Fläche scannend vermessen worden wäre, wäre eine Nachjustierung einzelner Paneele mittels Scannerpunktswolken umständlich gewesen. Aber auch die hier lediglich notwendige Neupositionierung der Zylinderparabole als Ganzes relativ zum Einspeisemodul wäre mit einem scannenden Verfahren nur schwierig zu bewerkstelligen gewesen.

6 Resumee und Ausblick

Voraussetzung für die Flächenerfassung mit Lasertrackern ist, dass die Fläche antastbar und weniger konkav gekrümmt ist als der Reflektor konvex. Es sollte auf eine sorgfältige Reflektoroffsetkorrektur geachtet werden, wobei die Wahl eines kleinen Reflektordurchmessers beiden Aspekten entgegen kommt. Während es sich bei der Reflektoroffsetkorrektur zumindest bei der Berechnung aus der gemessenen Ist-Fläche um ein rein geometrisches Modell handelt, können physikalische Aspekte der Materialbeschaffenheit bei reflektorlosen (scannenden) Messverfahren zu noch nicht völlig erforschten und somit nicht modellierbaren Phänomenen führen. Lasertracker erfassen ein großes Messvolumen bei hoher Genauigkeit und erlauben zusätzlich die unkomplizierte Erfassung von punktdefinierten Elementen. Die Zukunft könnte die Kopplung von Lasertrackern mit Handscannern bieten, wobei ein kostengünstiges Trackingverfahren unter Nutzung von stationären Triangulationsscannern sicher dem Anwender mehr Flexibilisierung bieten würde.

7 Literatur

- DEPENTHAL, C., BARTH, M. [2007]: Zur Leistungsfähigkeit eines zeitreferenzierten Dreharms als Prüfmittel für 4D-Messsysteme in Hochgeschwindigkeitsanwendungen. in Vorbereitung.
- HENNES, M. [2006]: Zur Flächenrückführung mit Lasertrackern. Seminar Terrestrisches Laser-Scanning, Fulda, 9./10.11.2006. DVW Mitteilungen Bd. 51/2006, S.201 - 112.
- JURETZKO, M. [2007]: Untersuchungen zur Wiederholgenauigkeit eines geregelten Winkelmesssystems am Beispiel eines Lasertrackers LTD 500. Beitrag zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, 17.-20. April 2007, Graz (im Druck).
- JURETZKO, M. [2006]: Leistungsfähigkeit des reflektorlosen Distanzmessmoduls R300 der Tachymeterserie TPS1200 von Leica. FuB, 2/2006, S.90-95.
- JURETZKO, M.; RICHTER, E.; PAQAY, M.; VOKURKA, V. [2006]: Compact range calibration and alignment.. Proceedings AMTA Europe Symposium 2006, Munich, May 1-4, 2006, pp. 270-275.
- RICHTER, E.; JURETZKO, M. [2007]: Das Messverhalten des reflektorlosen Distanzmessmoduls R300 der Leica TPS1200-Serie an Kanten. AVN; im Druck.
- RUNGE, P. [2007]: Evaluierung von Spatial Analyzer, einer grafischen 3D-Messsoftware, ZfV, In Druck.
- NN (2006): Datasheet Laserradar, DS-MV224-0606.pdf, und „Metris Laser radar“ (Laserradar.pps), Metris, Leuven, B.