

# Grundlagen einer Berechnungsmethodik zur rechnergestützten Ermittlung des Kraft- und Leistungsbedarfs von Bodenbearbeitungsgeräten

Dozent Dr. sc. techn. G. König, KDT, Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Sektion Landtechnik

## 1. Problem- und Zielstellung

Die Ermittlung des Kraft- und Leistungsbedarfs von Bodenbearbeitungsgeräten ist eine wesentliche Voraussetzung, um die Effektivität der Arbeit bei der Projektierung und beim Betrieb von Bodenbearbeitungsaggregaten zu erhöhen. Gegenwärtig werden weder im konstruktiven Entwicklungsprozeß noch bei der technischen Vorbereitung des Einsatzes von Bodenbearbeitungsaggregaten Berechnungen in der im Bild 1 dargestellten umfassenden Form vorgenommen. Dabei ist beispielsweise bekannt, daß

- besonders bei leistungsstarken Bodenbearbeitungsaggregaten eine von der Arbeits- und Kraftmaschine wechselseitig abhängige konstruktive Entwicklungsarbeit notwendig ist
- ein erheblicher Betrag des für die Bodenbearbeitung benötigten Kraftstoffs durch Vorausberechnungen aufwandgünstiger beeinflußt werden kann
- durch Berechnung der Radlast in Abhängigkeit von den Kopplungsvarianten zwischen Traktor und Gerät/Maschine auf eine höhere Auslastung der Motorleistung bei Einhaltung von Grenzen der Bodenbelastung Einfluß genommen werden kann.

Das Ziel bestand darin, für den landtechnischen Ingenieur eine der komplexen Betrachtungsweise entsprechende einheitliche Berechnungsmethodik zur Ermittlung des Kraft- und Leistungsbedarfs zu schaffen, mit

der er in der Lage ist, rechnergestützt die Projektierung und den Betrieb von Bodenbearbeitungsaggregaten aus energetischer Sicht vorzunehmen.

## 2. Stand der Berechnungsmethoden

Die theoretischen Untersuchungen zum Stand der Berechnung des Kraft- und Leistungsbedarfs haben ergeben, daß es z. Z. keine einheitliche Methode gibt, mit der die Vielfalt der Bodenbearbeitungswerkzeuge, -geräte, -maschinen und -aggregate, die Unterschiedlichkeit ihrer Kopplungen und Kombinationen, die Mannigfaltigkeit der Betriebsanforderungen und die Verschiedenheit der Böden erfaßt werden [1].

Es liegen Einzelmethoden vor,

- die sich auf das Werkzeug, das Gerät oder die Maschine beziehen
- die auf den verschiedensten theoretischen Grundlagen basieren
- bei denen sehr unterschiedlich Konstruktions-, Betriebs- und Stoffparameter in die Berechnung einbezogen werden
- die nur teilweise die Kraftrichtung und sehr selten den Kraftangriffspunkt beinhalten
- für die nur lückenhafte, aufeinander nicht abgestimmte und zum größten Teil veraltete Kenn- und Richtwerte vorliegen
- die verschiedenartige und miteinander wenig vergleichbare Termini aufweisen.

Die Ursache für diesen Entwicklungsstand

wird im Fehlen einer von Anfang an konsequenten Unterscheidung und Weiterentwicklung von anwendungsorientierten Berechnungsmethoden gesehen, wie sie z. B. in Form von technisch-theoretischen Berechnungsmethoden zur Werkzeugentwicklung und in Form von technisch-empirischen Methoden für die Projektierung und den Betrieb von Maschinen und Anlagen in anderen Disziplinen des Maschinenbaus vorliegen.

Ansätze für eine solche Betrachtungsweise bei Bodenbearbeitungsgeräten gab es bereits in der 2. Hälfte des vergangenen Jahrhunderts mit den von Segnitz und Föppl erarbeiteten Gleichungen für die technisch-theoretische und den von Wüst geschaffenen Grundlagen für die technisch-empirische Berechnung des Kraftbedarfs [2]. Auch Söhne machte in den 50er Jahren - ausgehend vom Beispiel der theoretischen Hydromechanik und der Hydraulik - darauf aufmerksam, daß neben der Kraftermittlung auf der Basis einer theoretischen Bodenmechanik auch eine technische Kraftberechnung für die Praxis erforderlich ist [3].

Bei der weiteren Entwicklung der Kraft- und Leistungsbedarfsberechnungen für Bodenbearbeitungswerkzeuge, -geräte und -maschinen sind daher zwei sich ergänzende Wege konsequent zu beschreiten.

Zum einen ist eine Berechnungsmethodik für ihre Konstruktion auf der Grundlage der Einbeziehung einer Vielzahl von Konstruktions-

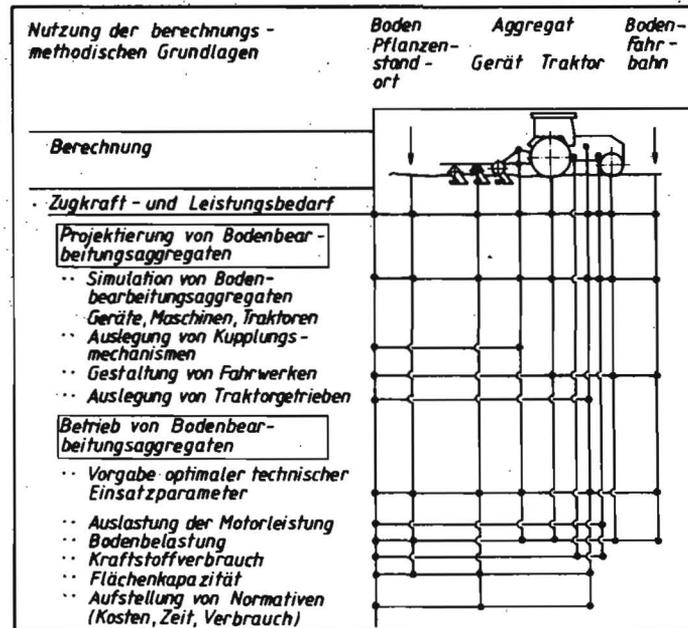
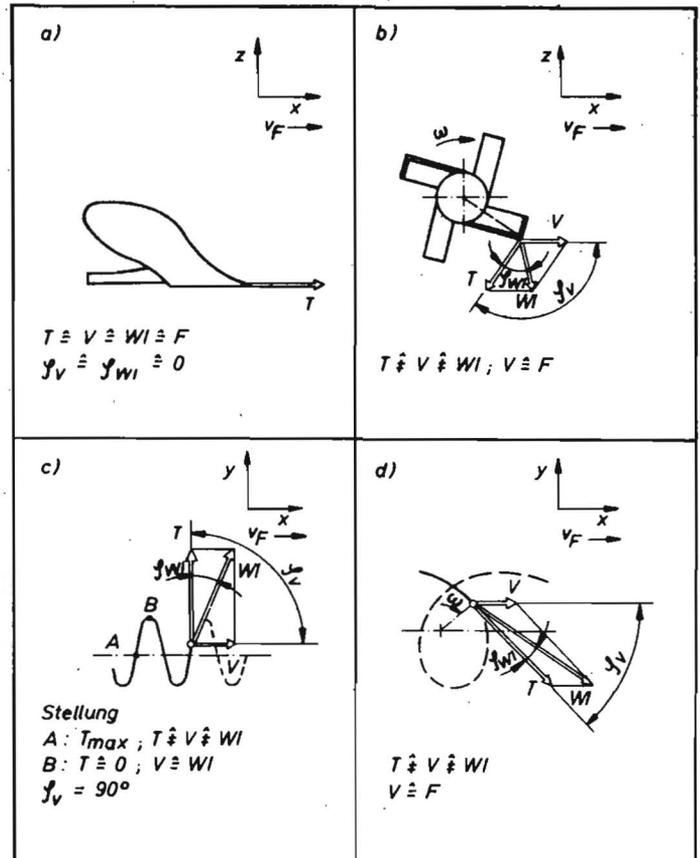
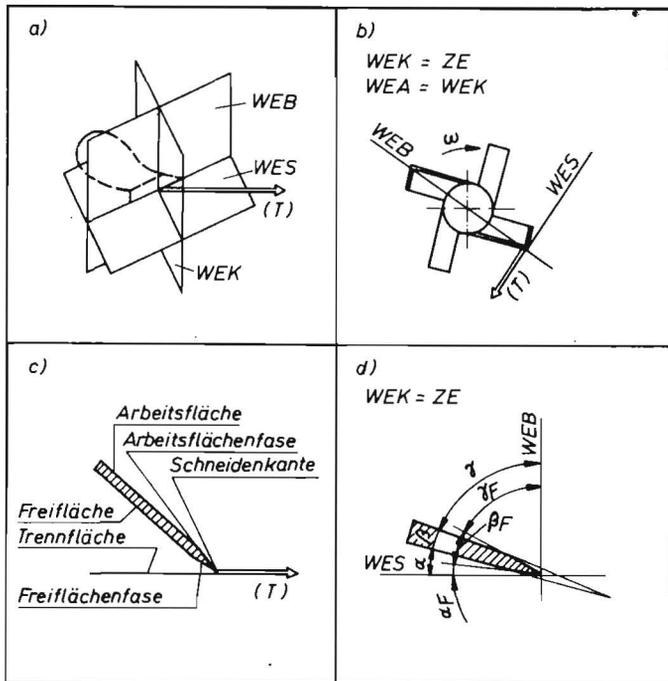


Bild 1. Möglichkeiten der Nutzung der berechnungsmethodischen Grundlagen zur Ermittlung des Kraft- und Leistungsbedarfs eines Bodenbearbeitungsaggregats

Bild 2. Festlegungen zur Kinematik beim Bodenbearbeitungsvorgang (Auszug):

- a) Scharpflugkörper, b) Fräsmesser, c) Rütteleggenzinken, d) Kreiselleggenzinken





parametern zu schaffen, und zum anderen ist eine Berechnungsmethode für ihren Betrieb zu entwickeln, wobei je nachdem vom zu fertigenden bzw. einzusetzenden Werkzeug ausgegangen wird. Damit können unabhängig voneinander Lösungen gefunden und systematisch ausgebaut werden, die zumindest bei dem in den nachfolgenden Ausführungen zu betrachtenden zweiten Weg zu Vereinfachungen führen, die aufgrund der integralen Einbeziehung des Werkzeugs in die Kraftberechnung möglich sind und nach Untersuchungen zum Einfluß der einzelnen Konstruktionsparameter als sinnvoll angesehen werden.

### 3. Berechnungsmethode

#### 3.1. Begriffe und Vereinbarungen

Bei der Entwicklung der Berechnungsmethode war es erforderlich, ausgehend von der vorgenommenen anwendungsorientierten Ausrichtung der Methode, zur Kennzeichnung der Struktur und der Einstellung des Werkzeugs im Betrieb ein Werkzeugbezugssystem und ein Wirkbezugssystem einzuführen, da die Kräfte durch unterschiedliche Einstellung der Werkzeuge beim Bodenbearbeitungsvorgang ihren Betrag, ihre Lage und ihre Richtung verändern, was mit den Termini des Werkzeugbezugssystems nicht mehr ausreichend beschrieben werden kann. Das Werkzeugbezugssystem kennzeichnet dabei die Geometrie am Werkzeug und das Wirkbezugssystem die Geometrie beim Bodenbearbeitungsvorgang.

Mit Festlegungen zur Kinematik beim Bodenbearbeitungsvorgang (Bild 2), die sich auf die Charakterisierung der Bewegungen zwischen Werkzeug und Boden, ihre Richtungen sowie die Geschwindigkeiten zwischen Werkzeug und Boden beziehen, wurden Voraussetzungen zu Definitionen im Werkzeug- und Wirkbezugssystem geschaffen. Dabei entspricht die Trennbewegung T der Hauptbewegung zwischen Werkzeug und Boden, die zum örtlichen Aufheben des Stoffzusammenhalts führt. Weiterhin werden Vorschubbewegung V, Wirkbewegung W und Fahrbewegung F unterschieden.

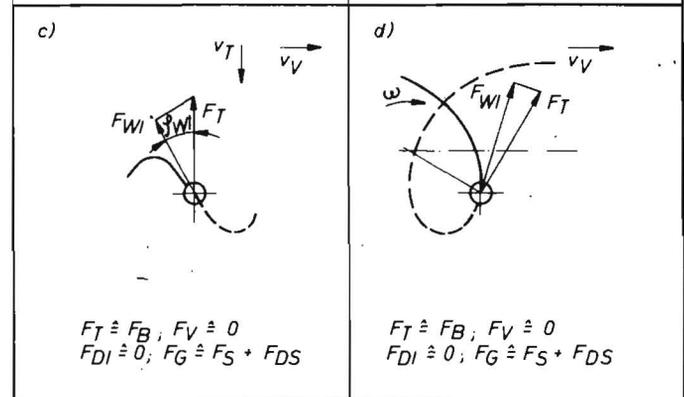
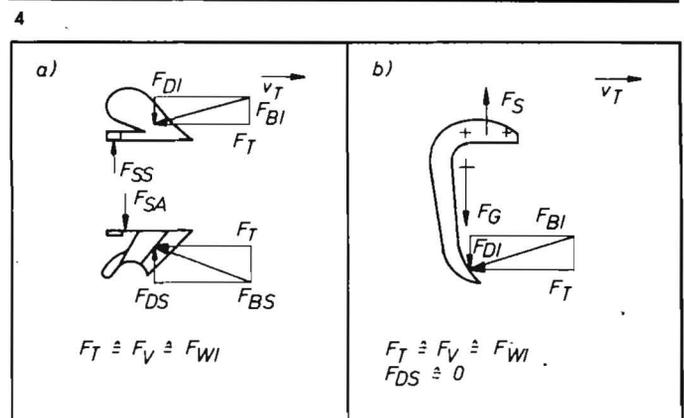
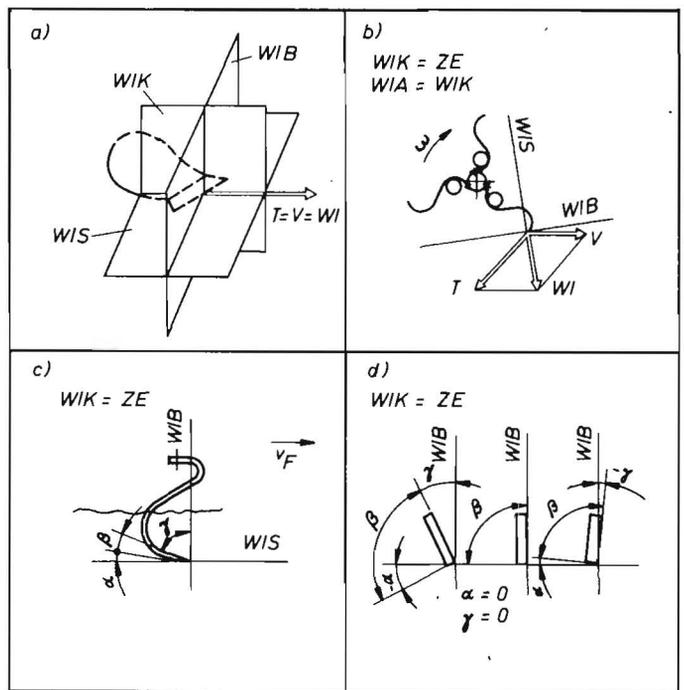
Das Werkzeugbezugssystem wurde durch

Bild 3  
Festlegungen für Größen im Werkzeugbezugssystem (Auszug);  
a), b) Ebenen (Scharpflugkörper, Fräsmesser)  
c) Flächen  
d) Winkel

Bild 4  
Festlegungen für Größen im Wirkbezugssystem (Auszug);  
a), b) Ebenen (Scharpflugkörper, Fräshaken)  
c), d) Winkel (Grubberwerkzeug, Schleppbalken)

Bild 5  
Festlegungen für die Kräfte am Werkzeug (Auszug);  
a) Pflugkörper  
b) Grubberwerkzeug  
c) Rütteleleggenzinken  
d) Kreiseleggenzinken

Definition von Werkzeugbezugsebene (WEB), Werkzeugschneideebene (WES) und Werkzeugkeilebene (WEK) festgelegt, wonach Flächen, Kanten, Ecken und Winkel näher bestimmt werden konnten. Als Werkzeugbezugsebene dient die Ebene, die durch eine sich im betrachteten Schneidpunkt drehende Gerade, die nach einer Werkzeughauptfläche, -kante, -achse oder -ecke ausgerichtet ist, gebildet wird (Bild 3). Dabei sollte sie vorzugsweise rechtwinklig zur angenommenen Trennrichtung liegen. In vergleichsweise ähnlicher Form erfolgte die Definition des Wirkbezugssystems, wobei sich die Festlegungen auf die Wirkbezugsebene (WIB) beziehen, die durch eine sich im betrachteten Schneidpunkt drehende und rechtwinklig zur Wirkrichtung stehende Gerade gebildet wird (Bild 4).



Eine Erweiterung der Struktur der Festlegungen im Wirkbezugssystem wurde durch die Einführung von Arbeitsgrößen, wie Trenn- und Bearbeitungsgrößen, erforderlich.

#### 3.2. Kraftberechnungsmodell

Die im Wirkbezugssystem, d. h. beim Bodenbearbeitungsvorgang, am Werkzeug auftretenden Kräfte sind die Bearbeitungskraft  $F_B$ , die Gewichtskraft  $F_G$ , die Stützkraft  $F_S$  und die sich daraus ergebende Antriebskraft  $F_A$ . Sie befinden sich beim Bodenbearbeitungsvorgang in einem äußeren Kräftegleichgewicht und haben nach ihrem Verlauf einen dynamischen Charakter, wobei für die Projektion und den Betrieb der Werkzeuge, Geräte und Maschinen eine quasistatische Betrachtung des Kräftegleichgewichts ausreichend ist (Bild 5). Als Bearbeitungskraft  $F_B$

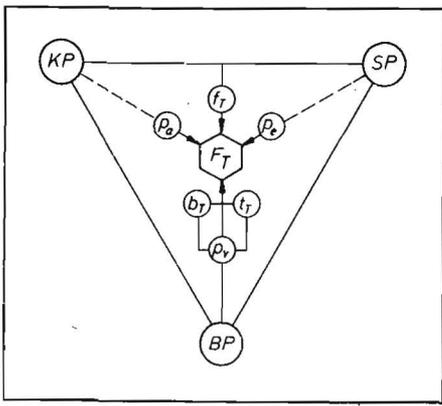


Bild 6. Schematisches Modell zur Berechnung der Trennkraft

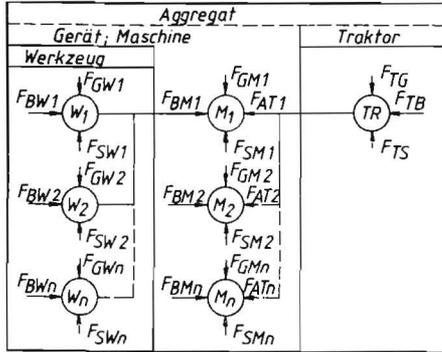


Bild 7. Grundsystematik der Kraftberechnungsmodelle

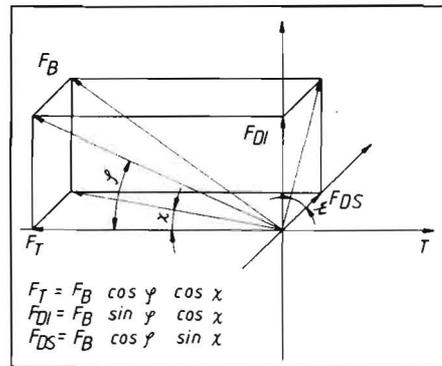


Bild 8. Kraftberechnungsmodell für Werkzeuge

wird die beim Bodenbearbeitungsvorgang auf das Werkzeug wirkende Gesamtkraft bezeichnet.

Die Komponente der Bearbeitungskraft entgegen der Trennrichtung ist die Trennkraft  $F_T$ . Komponenten der Bearbeitungskraft, die das Werkzeug aus der Trennrichtung drängen, werden als Drangkräfte  $F_D$  bezeichnet. Sie entsprechen der Projektion der Bearbeitungskraft senkrecht zur Arbeitsebene bzw. der Projektion in die Arbeitsebene und jeweils senkrecht zur Trennrichtung ( $F_{DS}$ ,  $F_{DI}$ ). Wirk- und Vorschubkraft  $F_{WI}$  bzw.  $F_V$  ergeben sich durch Projektion der Bearbeitungskraft in die jeweilige Richtung. Die Gewichtskraft  $F_G$  ist die am Werkzeug wirkende Schwerkraft. Stützkraft  $F_S$  ist die Reaktionskraft zu den wirkenden Aktionskräften.

Als Grundlage zur Ermittlung der Bearbeitungskraft wird ihre wichtigste Komponente, die Trennkraft  $F_T$ , verwendet. Sie ist die beim Bodenbearbeitungsvorgang ursächlich

auf tretende Widerstandskraft am Werkzeug.  $F_T$  ist unabhängig von den Einsatzparametern in ihrer Richtung bestimmt, was die Übertragung der Kraft aus dem Wirkbezugsystem in das für die Berechnung der Antriebskraft zugrunde zu legende Werkzeugbezugsystem ermöglicht.

Nach analytischen Betrachtungen zu den Einflußgrößen auf den Kraftbedarf werden in die Berechnung einbezogen:

- Werkzeug als integrales Bauelement (in bezug auf den Einfluß der Konstruktionsparameter)
- Trenntiefe, -breite und -geschwindigkeit (im Hinblick auf den Einfluß der Betriebsparameter)
- Schubfestigkeit  $\tau$  des Bodens (bezüglich des Einflusses der Stoffparameter).

Die Trennkraft wird auf der Grundlage experimentell ermittelter spezifischer Trennkraftwerte  $f_T$  in Abhängigkeit des vom Werkzeug im Boden bearbeiteten Trennquerschnitts  $b_T \cdot t_T$  bestimmt (Bild 6). Mit Präzisierungsfaktoren werden dabei die Trenngeschwindigkeit  $p_v$ , die Abnutzung der Werkzeuge  $p_a$  und die extremen Belastungen  $p_e$  berücksichtigt.

Die spezifische Trennkraft ist eine werkzeugbezogene Größe, die in Abhängigkeit von der Schubfestigkeit des Bodens ermittelt wird. Sie bezieht sich auf den für das Werkzeug vorgesehenen Trennquerschnitt und wird für eine theoretische Trenngeschwindigkeit von 0 m/s als Bezugsgröße festgelegt.

Bei der Suche nach den sich darauf aufbauenden Kraftberechnungsmodellen wurde von der im Bild 7 dargestellten Grundsystematik ausgegangen. Das Ziel bestand darin, für die unterschiedlichsten Werkzeuge, Geräte, Maschinen und Aggregate wenige, aber alle Varianten umfassende Modelle mit einem hohen Abstraktionsgrad zu ermitteln, mit denen eine rechnergestützte Bestimmung des Kraftbedarfs möglich ist.

Für Werkzeuge wurde das im Bild 8 ersichtliche einheitliche Kraftberechnungsmodell zugrunde gelegt. Je nach Betrag und Richtung der Bearbeitungskraft gegenüber der Trennkraft, entsprechend der Wirkung der Drangkräfte sowie nach der Bahn des Kraftangriffspunktes der Bearbeitungskraft (fortschreitend, fortschreitend-schwingend, fortschreitend-drehend) werden 27 Varianten des Kraftberechnungsmodells unterschieden (Bild 9).

Für alle Varianten des Werkzeugberechnungsmodells wurden Berechnungsgrundlagen ermittelt.

Analog zur Grundstruktur des Berechnungsmodells für Werkzeuge erfolgte die Aufstellung des Kraftberechnungsmodells für Geräte und Maschinen unter Berücksichtigung seiner Einordnung in die Grundsystematik der Kraftberechnungsmodelle. Damit waren die Grundlagen für eine einheitliche Berechnungsmethodik gegeben.

Mit den sich darauf aufbauenden Grundlagen zur Anwendung der Methode, dem erforderlichen Rechenprogramm sowie den notwendigen Kenn- und Richtwerten konnten vielfältige Anwendungsberechnungen durchgeführt werden [1, 4].

#### 4. Zusammenfassung

Zur energetischen Bewertung von Bodenbearbeitungsaggregaten bei ihrer Projektierung und ihrer technischen Einsatzvorbereitung ist es notwendig, den Kraft- und Leistungsbedarf der Bodenbearbeitungsgeräte und -maschinen vorzuberechnen. Auf der Grundlage von theoretischen Untersuchungen wird die Notwendigkeit der Schaffung einer einheitlichen technisch-energetischen Berechnungsmethode zur rechnergestützten Ermittlung des Kraft- und Leistungsbedarfs abgeleitet. Bei Nutzung von bisher praktizierten Ansätzen der Kraftberechnung erfolgt die Darstellung von Grundlagen einer neuen Berechnungsmethodik, die sich auf einheitlich zugrunde gelegte Termini zur Kinematik und zur Kinetik beim Bodenbearbeitungsvorgang sowie zur Geometrie am Werkzeug und beim Bodenbearbeitungsvorgang stützt. Darauf aufbauend werden Berechnungsmodelle für Werkzeuge, Geräte und Maschinen erarbeitet.

#### Literatur

- [1] König, G.: Berechnungsmethodische Grundlagen zur rechnergestützten Ermittlung des Kraft- und Leistungsbedarfs für die Projektierung und für den Betrieb von Bodenbearbeitungsgeräten, -maschinen und -aggregaten. Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Dissertation B 1988.
- [2] König, G.: Die Anfänge der Zugkraftermittlung an Bodenbearbeitungsgeräten. agrartechnik, Berlin 39 (1989) 3, S. 138-140.
- [3] Söhne, W.: Einige Grundlagen für eine landtechnische Bodenmechanik. Grundlagen der Landtechnik, Düsseldorf 6 (1956) 7, S. 11-27.
- [4] König, G.; Olbrich, A.: Modellierung des Kraft- und Leistungsbedarfs von Bodenbearbeitungsgeräten. In: Grundlagen zur Entwicklung bodenschonender und energiesparender Radfahrwerke für Traktoren und selbstfahrende Landmaschinen zum Einsatz auf druckempfindlichen Böden. Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Forschungsbericht 1988. A 5573

Bild 9. Varianten des Kraftberechnungsmodells für Werkzeuge mit fortschreitend-drehender Bahn des Kraftangriffspunktes (Auszug)

