

Μεταπτυχιακή Εργασία

Ανάπτυξη, κατασκευή και δοκιμή τραπεζιού για επιτραπέζια εργαλειομηχανή υψηλής ακρίβειας.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»



ΤΕΧΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ KAISERSLAUTERN

ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΤΜΗΜΑ "FBK" ΜΕΣΩ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ERASMUS

Επιβλέπων καθηγητής : Γεώργιος Βοσνιάκος

Ονοματεπώνυμο φοιτητή : Ιωάννης Μακρής

Kaiserslautern, Ιούλιος 2014

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014



Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε κατά το μεγαλύτερο τμήμα της στο τεχνικό πανεπιστήμιο της Kaiserslautern Γερμανίας, στα πλαίσια προγράμματος ανταλλαγής φοιτητών Erasmus. Επιβλέπων καθηγητής από την πλευρά του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου ήταν ο κ. Γεώργιος Βοσνιάκος. Υπεύθυνος καθηγητής από το Πανεπιστήμιο της Kaiserslautern ήταν ο κ. Jan C. Aurich, επί της ουσίας όμως συνεργάστηκα με τον επιστημονικό του συνεργάτη κ. Martin Bohley. Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω όλους τους προαναφερόμενους για την πολύτιμη βοήθεια και υποστήριξή τους.

Το πρωτότυπο της εργασία αυτής, το οποίο βρίσκεται στο παράρτημα της παρούσας, γράφηκε στη γερμανική γλώσσα σύμφωνα με τα πρότυπα του πανεπιστημίου υποδοχής. Ένα αντίγραφο κατατέθηκε επίσημα στο πανεπιστήμιο της Kaiserslautern, παρουσιάστηκε σε τριμελή επιτροπή και αξιολογήθηκε από τους εκεί υπευθύνους. Έπειτα μεταφράστηκε εξ' ολοκλήρου στα ελληνικά και παρουσιάστηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.



"Η ολοκλήρωση της εργασίας αυτής έγινε στο πλαίσιο της υλοποίησης του μεταπτυχιακού προγράμματος το οποίο συγχρηματοδοτήθηκε μέσω της Πράξης "Πρόγραμμα χορήγησης υποτροφιών ΙΚΥ με διαδικασία εξατομικευμένης αξιολόγησης ακαδημαϊκού έτους 2012-2013" από πόρους του Επιχειρησιακού προγράμματος "Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση", του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου (ΕΚΤ) του ΕΣΠΑ, 2007-2013."

This project was completed as part of the postgraduate programme co-financed by the Act "Scholarships programme SSF (State Scholarships Foundation) with an individualized assessment process of the Academic Year 2012-2013" from resources of the Operational Programme "Education and Lifelong Learning", of the European Social Fund (ESF), the NSRF 2007-2013.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	I
Κατάλογος Σχημάτων	III
Περίληψη.....	6
1 Εισαγωγή.....	7
2 Στόχοι της εργασίας.....	8
3 Εξέλιξη της τεχνολογίας	9
3.1 Διαδικασίες για την κατασκευή μικροεργαλείων.....	9
3.1.1 Λείανση μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης.....	9
3.1.2 Εστιασμένες δέσμες ιόντων (FIB)	12
3.1.3 Λείανση.....	14
3.2 Δομικά στοιχεία των εργαλειομηχανών.....	16
3.2.1 Οδηγοί και έδραση.....	16
3.2.2 Μηχανισμοί μετάδοσης κίνησης.....	20
4 Περιγραφή της νέας μηχανής	24
5 Εξαρτήματα της κατασκευής.....	26
5.1 Περιστροφικό τραπέζι	26
5.2 Γραμμικό τραπέζι.....	27
5.3 Μετάδοση της ροπής	29
5.3.1 Επιλογή προφίλ του ιμάντα	30
5.3.2 Ακρίβεια μεταφοράς και ακαμψία περιστροφής	31
5.3.3 Μέγιστος ρυθμός περιστροφής και απαιτούμενη ροπή επιτάχυνσης.....	32
5.3.4 Καθορισμός αριθμού δοντιών σύμφωνα με τον κατάλογο της Continental	32
5.3.5 Υπολογισμός πλάτος ιμάντα.....	33
5.3.6 Υπολογισμός μήκος ιμάντα.....	33
5.3.7 Υπολογισμός ακαμψίας περιστροφής και γωνιακού σφάλματος	34
5.3.8 Υπολογισμός δύναμης προέντασης (Fv)	35
5.4 Κινητήρας	37
5.5 Προεντατήρας.....	38
5.6 Δίσκοι λείανσης και κινητήρας	39
5.7 Συγκράτηση δίσκου λείανσης	41
5.8 Έλεγχος ταχύτητας περιστροφής των δίσκων λείανσης	43
5.8.1 Ηλεκτρονικός ελεγκτής ταχύτητας.....	43
5.8.2 Μικροελεγκτής	44
5.8.3 Αισθητήρες υπερύθρων	45
5.8.4 Ηλεκτρονικό κύκλωμα.....	46
5.8.5 Προγραμματισμός.....	46
5.8.6 Κατασκευή και δοκιμή του κυκλώματος	48

5.8.7	Πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος	49
5.8.8	Περίβλημα της συσκευής	50
5.9	Συγκράτηση κινητήρων και αισθητήρων	52
5.10	Βάση.....	53
5.11	Φλάντζα άξονα	55
5.12	Κάλυμμα ιμάντα.....	55
5.13	Πλάκα μονταρίσματος	56
5.14	Σχέδια συναρμολόγησης	57
5.15	Συναρμολόγηση των τεμαχίων	59
6	Κατασκευαστικά σχέδια	61
7	Θέση σε λειτουργία.....	68
7.1	Τοποθέτηση επάνω σε Χ-Υ τραπέζι	68
7.2	Τοποθέτηση της ατράκτου.....	69
7.3	Έλεγχος των αξόνων.....	69
7.4	Διαδικασία κατασκευή και αποτελέσματα	70
8	Συμπεράσματα	73
9	Βιβλιογραφία.....	74
10	Παράρτημα - Πρωτότυπη εργασία στα γερμανικά.....	77

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1, σκαρίφημα πρωτότυπης μηχανής	8
Εικόνα 2, αρχή λειτουργίας της μεθόδου WEDG [Morg03].....	10
Εικόνα 3, κατασκευαστική διαδικασία μικροεργαλείου μέσω WEDG [Cher06]	10
Εικόνα 4, πλάγια όψη ενός μικροεργαλείου [Cher06].....	11
Εικόνα 5, κατασκευή μικροεργαλείου φρεζαρίσματος μέσω μεθόδου FIB [Adam00].	12
Εικόνα 6, μικροεργαλεία φρεζαρίσματος με 2, 4 και 6 επιφάνειες [Adam00]	13
Εικόνα 7, γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός μικροεργαλείου φρεζαρίσματος [Auri12]	14
Εικόνα 8, σκαρίφημα μηχανής λείανσης τριών αξόνων [Auri12].....	14
Εικόνα 9, διαδικασία κατασκευής μικροεργαλείου φρεζαρίσματος μέσω λείανσης [Auri12].....	15
Εικόνα 10, μικροεργαλείο φρεζαρίσματος με 3 διαφορετικές γωνίες κλίσης [Auri12]	16
Εικόνα 11, υδροδυναμικός οδηγός [Venk07].....	17
Εικόνα 12, υδροστατικοί οδηγοί [Alti11].....	17
Εικόνα 13, αρχή λειτουργίας αεροστατικού οδηγού [Uria09]	19
Εικόνα 14, διαφορετικοί τύποι οδηγών με ρουλεμάν [Alti11]	19
Εικόνα 15, σύστημα οδοντωτού κανόνα – γραναζιού με ηλεκτρική προένταση [Alti11]	20
Εικόνα 16, ατέρμονας με ανακυκλούμενα σφαιρίδια [Alti11]	21
Εικόνα 17, προένταση του ατέρμονα με ανακυκλούμενα σφαιρίδια [Alti11]	21
Εικόνα 18, είδη ατέρμονα με ανακυκλούμενα σφαιρίδια [Alti11].....	21
Εικόνα 19, μετάδοση μέσω τριβής [Venk07]	22
Εικόνα 20, γραμμικός κινητήρας [Uria09]	23
Εικόνα 21, σχέδιο της νέας μηχανής	24
Εικόνα 22, εξαρτήματα της κατασκευής	26
Εικόνα 23, περιστροφικό τραπέζι της εταιρείας LT Ultra	27
Εικόνα 24, τρισδιάστατα σχέδια περιστροφικού τραπεζιού	27
Εικόνα 25, τεχνικά χαρακτηριστικά του γραμμικού τραπεζιού [Aero14].....	28
Εικόνα 26, Aerotech ANT130-110-L.....	29
Εικόνα 27, τρισδιάστατα σχέδια του τραπεζιού	29
Εικόνα 28, πρώτη εναλλακτική λύση : απευθείας μετάδοση.....	30
Εικόνα 29, επιλογή προφίλ του ιμάντα [Opti13].....	30
Εικόνα 30, οδοντωτό προφίλ AT5 [Gate11].....	31

Εικόνα 31, επιθυμητή γωνία περιστροφής	32
Εικόνα 32, επιθυμητός χρόνος επιτάχυνσης	32
Εικόνα 33, Καθορισμός των σταθερών Mspez και Fspez [Cont12]	33
Εικόνα 34, επιλογή μήκος ιμάντα [Cont12]	33
Εικόνα 35, μοντέλο οδοντωτού ιμάντα [Raim09]	34
Εικόνα 36, καθορισμός της επιτρεπόμενης ελκτικής δύναμης [Cont12]	34
Εικόνα 37, καθορισμός της ειδικής ακαμψίας [Raim09]	35
Εικόνα 38, δυνάμεις ιμάντα [Cont12]	35
Εικόνα 39, μετάδοση χωρίς παίξιμο μέσω υπερτάνισης [Raim09]	36
Εικόνα 40, συνηθισμένα, μειωμένα και μηδενικά κενά [Cont12]	36
Εικόνα 41, τεχνικά χαρακτηριστικά CRK566PMBP [Ori14]	37
Εικόνα 42, 3D-σχέδια του βηματικού κινητήρα	38
Εικόνα 43, υπολογισμός επιμήκυνσης ιμάντα	38
Εικόνα 44, μηχανισμός προέντασης	39
Εικόνα 45, δίσκος λείανσης Disco NBC-ZH204J	39
Εικόνα 46, βασική ιδέα της πρώτης λύσης	40
Εικόνα 47, συσκευή μέτρησης εκκενρότητας	40
Εικόνα 48, αποτελέσματα του Spindle Error Analyzer	41
Εικόνα 49, κινητήρας σκληρού δίσκου	41
Εικόνα 50, μοντάρισμα κινητήρα και δίσκου λείανσης	41
Εικόνα 51, φινίρισμα του νέου εξαρτήματος	42
Εικόνα 52, LT-Ultra MTC250, τόνος υψηλής ακρίβειας	42
Εικόνα 53, Erregung der Spulen	43
Εικόνα 54, ESC-Συνδεσμολογία	44
Εικόνα 55, μορφή PWM σήματος για τον έλεγχο του ESC	44
Εικόνα 56, βασική αρχή των οπτικών στροφομέτρων	45
Εικόνα 57, εξάρτημα μετά από επεξεργασία με Laser	45
Εικόνα 58, ηλεκτρονικό σχέδιο κυκλώματος	46
Εικόνα 59, κατασκευή και δοκιμή του κυκλώματος	49
Εικόνα 60, κατασκευή και δοκιμή του κυκλώματος	49
Εικόνα 61, πρώτο κύκλωμα	50
Εικόνα 62, δεύτερο κύκλωμα	50
Εικόνα 63, τεμάχια του περιβλήματος	51
Εικόνα 64, συναρμολόγηση του περιβλήματος	51
Εικόνα 65, Speed Controller – έτοιμη συσκευή	52

Εικόνα 66, συγκράτηση κινητήρων και αισθητήρων	52
Εικόνα 67, συγκράτηση κινητήρων και αισθητήρων	53
Εικόνα 68, Βάση.....	53
Εικόνα 69, Συναρμολόγηση της βάσης	54
Εικόνα 70, βάση μετά την κατασκευή.....	54
Εικόνα 71, φλάντζα άξονα	55
Εικόνα 72, συναρμολόγηση της φλάντζας.....	55
Εικόνα 73, κάλυμμα ιμάντα.....	56
Εικόνα 74, συναρμολόγηση του καλύμματος ιμάντα	56
Εικόνα 75, πλάκα μονταρίσματος.....	56
Εικόνα 76, exploded view.....	57
Εικόνα 77, τομή πλάγιας όψης	58
Εικόνα 78, σχέδιο συναρμολόγησης	58
Εικόνα 79, σειρά συναρμολόγησης των τεμαχίων	59
Εικόνα 80, σειρά συναρμολόγησης των τεμαχίων	59
Εικόνα 81, σειρά συναρμολόγησης των τεμαχίων	59
Εικόνα 82, σειρά συναρμολόγησης των τεμαχίων	59
Εικόνα 83, τελική κατασκευή	60
Εικόνα 84, πειραματική διάταξη και ονομασία αξόνων	68
Εικόνα 85, μέτρηση της παραλληλίας.....	69
Εικόνα 86, λογισμικό Aerotech A3200.....	69
Εικόνα 87, βήματα κατασκευής ενός μικροεργαλείου	70
Εικόνα 88, βήματα κατασκευής ενός μικροεργαλείου	70
Εικόνα 89, βήματα κατασκευής ενός μικροεργαλείου	71
Εικόνα 90, μικροεργαλείο διαμέτρου 4 μm	71
Εικόνα 91, βήματα κατασκευής ενός μικροεργαλείου	72
Εικόνα 92, μικροεργαλείο διαμέτρου 50 μm	72

Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία κατασκευάστηκε τραπέζι εργαλειομηχανής CNC υψηλής ακρίβειας, το οποίο διαθέτει έναν γραμμικό και ένα περιστροφικό άξονα. Δύο λειαντικοί δίσκοι τοποθετήθηκαν επάνω στο τραπέζι που έχουν σαν στόχο την δημιουργία μικροεργαλείων μέσω διαδικασίας λείανσης.

Στην αρχή της εργασίας παρουσιάστηκαν οι διάφοροι μέθοδοι κατασκευής μικροεργαλείων που υπάρχουν στην βιβλιογραφία και εξηγήθηκαν τα ιδιαίτερα πλεονεκτήματα της κατασκευής μέσω λείανσης. Έπειτα αναζητήθηκε στην βιβλιογραφία και γενικά στο internet ποια είναι τα σημαντικότερα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται στις εργαλειομηχανές και ιδιαίτερα στις σύγχρονες εργαλειομηχανές. Από την αναζήτηση αυτή διαπιστώθηκε ότι ένα γραμμικό τραπέζι με Cross Roller οδηγούς και γραμμικό ηλεκτροκινητήρα εκπληρούσε τις απαιτήσεις της εργασίας. Σχετικά με τον περιστροφικό άξονα χρησιμοποιήθηκε περιστροφικό τραπέζι που υπήρχε ήδη στο εργαστήριο παραγωγής του πανεπιστημίου, ενώ για την κίνηση αυτού χρησιμοποιήθηκε βηματικός κινητήρας μέσω οδοντωτού ιμάντα. Για την λειτουργία των λειαντικών δίσκων χρησιμοποιήθηκαν δύο ηλεκτροκινητήρες από σκληρούς δίσκους Hitachi, συνεχούς ρεύματος άνευ ψηκτρών και για την οδήγηση αυτών αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε κατάλληλη συσκευή ελέγχου. Για την συναρμολόγηση των παραπάνω εξαρτημάτων, σχεδιάστηκαν σε CAD τα αναγκαία εξαρτήματα και κατασκευάστηκαν στις εργαλειομηχανές που διαθέτει το τεχνικό πανεπιστήμιο της Kaiserslautern.

Έπειτα πραγματοποιήθηκε η συναρμολόγηση των τμημάτων της κατασκευής και η δοκιμή λειτουργίας. Αν και τα υπόλοιπα τμήματα της υπό κατασκευής μηχανής δεν ήταν ακόμη έτοιμα, η κατασκευή δοκιμάστηκε μεμονωμένα. Κατασκευάστηκε τελικά ένα μικροεργαλείο με διάμετρο 4 μm και όλοι οι στόχοι της εργασίας επιτεύχθηκαν.

1 Εισαγωγή

Η συνεχής μείωση του μεγέθους των μηχανικών εξαρτημάτων θεωρείται από αρκετούς επιστήμονες σαν πρόκληση για την ανάπτυξη μιας μεγάλης γκάμας νέων προϊόντων. Βιομηχανίες όπως μικροηλεκτρονική, βιοτεχνολογία, αυτοκινητοβιομηχανία, αεροπλοΐα, επικοινωνίες, οπτική κ.α. απαιτούν όλο και συχνότερα μικροεξαρτήματα. Τα εξαρτήματα αυτά μπορούν να προσφέρουν μια εξοικονόμηση ενέργειας κατά την λειτουργία τους, λόγω περιορισμένου βάρους, αλλά μπορούν ακόμη να προσφέρουν και έναν υψηλό ρυθμό αποβολής θερμότητας, διότι η αναλογία επιφάνειας – όγκου είναι αρκετά υψηλή. Επιπλέον, έρευνες αποδεικνύουν ότι οι μηχανές μικροεπεξεργασίας είναι κατά πολύ αποδοτικότερες στην κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τις συμβατικές μηχανές.

Σύμφωνα με τον ορισμό του L. Altings Definition [Alti03], η μικροτεχνολογία ασχολείται με την ανάπτυξη και κατασκευή προϊόντων, των οποίων τα λειτουργικά χαρακτηριστικά ή τουλάχιστον η μιας τους διάσταση βρίσκεται στην τάξη των μm.

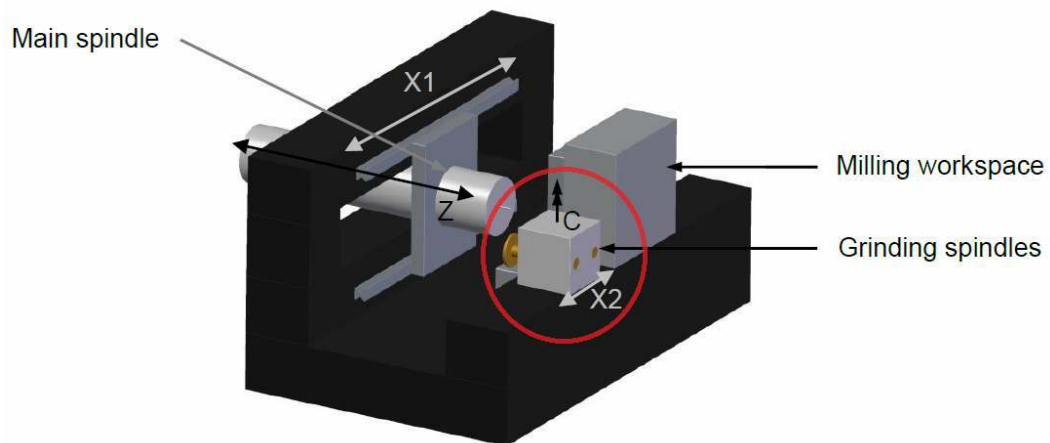
Η μηχανική επεξεργασία μικροσκοπικών αντικειμένων είναι μεταξύ άλλων μια διαδικασία κατάλληλη για την κατασκευή μικροσυσκευών και εξαρτημάτων, των οποίων οι διαστάσεις βρίσκονται μεταξύ 10 περίπου μm και μερικών χιλιοστών. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι κράματα μετάλλων, κεραμικά καθώς και διάφορα πολυμερή.

Στο εργαστήριο του τμήματος παραγωγής του τεχνικού πανεπιστημίου Kaiserslautern σχεδιάζεται και αναπτύσσεται μια υψηλής ακρίβειας φορητή εργαλειομηχανή. Με την ολοκλήρωσή της μηχανής θα είναι δυνατή η κατασκευή μικροεργαλείων διαμέτρου μόλις 3μm.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία θα πρέπει να σχεδιαστεί, κατασκευαστεί και δοκιμαστεί τραπέζι υψηλής ακρίβειας δύο αξόνων, το οποίο θα είναι τμήμα της αναφερόμενης παραπάνω φορητής εργαλειομηχανής. Επάνω στο τραπέζι αυτό θα εγκατασταθούν δύο λειαντικοί δίσκοι, οι οποίοι θα εγγυώνται μια αποδοτική διαδικασία λείανσης.

2 Στόχοι της εργασίας

Στο εργαστήριο του τμήματος παραγωγής του πανεπιστημίου της Kaiserslautern βρίσκεται από το 2012 μια υψηλής ακρίβειας φορητή εργαλειομηχανή, η οποία είναι σε θέση να παράγει μικροεργαλεία διαμέτρου έως και 7 μm . Στο ίδιο εργαστήριο υπάρχει επίσης εργαλειομηχανή κατάλληλη για χρήση των παραπάνω μικροεργαλείων. Για την εξάλειψη του σφάλματος εκκεντρότητας λόγω της μεταφοράς του εργαλείου από την μια μηχανή στην άλλη, μια νέα μηχανή βρίσκεται σε φάση σχεδιασμού και κατασκευής. Η βασική ιδέα της νέας μηχανής (Εικόνα 1) είναι ότι κατασκευή και η χρήση του μικροεργαλείου θα πραγματοποιείται στην ίδια μηχανή. Με αυτόν τον τρόπο θα είναι δυνατή η κατασκευή μικροεργαλείων με διάμετρο έως 3 μm .



Εικόνα 1, σκαρίφημα πρωτότυπης μηχανής

Στόχος της εργασίας είναι η κατασκευή ενός υψηλής ακρίβειας περιστροφικού τραπέζιού, το οποίο αργότερα θα τοποθετηθεί επάνω σε γραμμικό τραπέζι. Παράλληλα θα πρέπει να καθοριστούν τόσο τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κινητήρων, όσο και ο τρόπος μετάδοσης κίνησης (π.χ. απευθείας μετάδοση, ιμαντοκίνηση κ.τ.λ.). Επάνω στο περιστροφικό τραπέζι θα τοποθετηθούν δύο κινητήρες, οι οποίοι θα μεταδίδουν ροπή στους δίσκους λείανσης. Για τον έλεγχο των κινητήρων θα αναπτυχθεί ξεχωριστή συσκευή ελέγχου. Τέλος θα πρέπει να σχεδιαστούν και κατασκευαστούν τα μεμονομένα εξαρτήματα σύνδεσης, να συναρμολογηθούν μεταξύ τους καθώς και να γίνει δοκιμή λειτουργίας.

3 Εξέλιξη της τεχνολογίας

3.1 Διαδικασίες για την κατασκευή μικροεργαλείων

Για να μπορούν να κατασκευαστούν μικροεξαρτήματα εντός στενών ανοχών, θα πρέπει η μικροεπεξεργασία να είναι υψηλής ακρίβειας. Η ποιότητα των τελικών εξαρτημάτων καθορίζεται από την ποιότητα των εργαλειομηχανών καθώς και των εργαλείων. Ωστόσο η μειωμένη διαθεσιμότητα των μικροεργαλείων ήτανε πάντοτε ένα μεγάλο πρόβλημα στην μικροεπεξεργασία. Επίσης ο αναξιόπιστος χρόνος ζωής και η πρόωρη φθορά ενός εργαλείου είναι ακόμη δύο σημαντικά προβλήματα κατά την χρήση των μικροεργαλείων. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν πληθώρα διαδικασιών κατασκευής μικροσκοπικών εργαλείων. Σύμφωνα με τον Masuzawa [Masu00] οι περισσότερες διαδικασίες κατασκευής εργαλείων ανήκουν στις παρακάτω βασικές κατηγορίες :

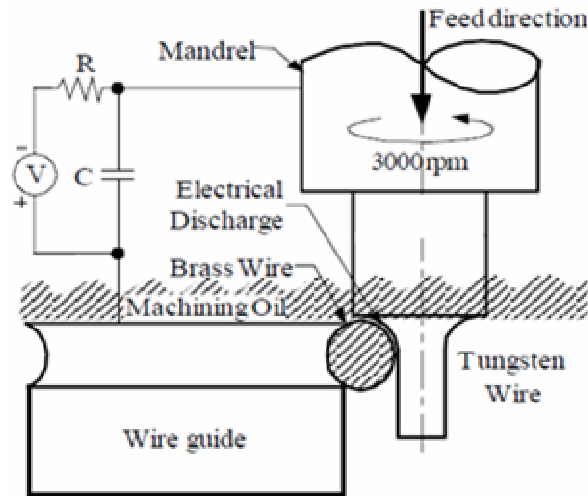
- Απομάκρυνση υλικού μέσω τήξης και εξάτμισης
- Απομάκρυνση υλικού μέσω διάβρωσης
- Απομάκρυνση υλικού μέσω μηχανικής επεξεργασίας

3.1.1 Λείανση μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης

Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε μια απλή θεωρία. Όταν δύο ηλεκτρόδια που τροφοδοτούνται με ηλεκτρική τάση και είναι χωρισμένα από διηλεκτρικό μέσο πλησιάσουν το ένα το άλλο, τότε το διηλεκτρικό μέσο που μέχρι εκείνη την στιγμή δεν ήταν αγωγίμο, διασπάται και τελικά άγει. Την στιγμή αυτή σχηματίζονται σπινθήρες μεταξύ των ηλεκτροδίων και συνεπώς θερμότητα, η οποία με την σειρά της χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση υλικού μέσω τήξης και εξάτμισης. Με τον ακριβή έλεγχο της θερμότητας που απελευθερώνεται είναι δυνατή η δημιουργία μικροσκοπικών χαρακτηριστικών σε κάθε αγωγίμο υλικό. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι το ηλεκτρόδιο κατά την διάρκεια της διαδικασίας φθείρεται και τελικά μπορεί να εξαντληθεί. Μια εναλλακτική τεχνική επινοήθηκε από τον Masuzawa και ονομάζεται **Wired Electro-Discharge Grinding**. [Masu08]

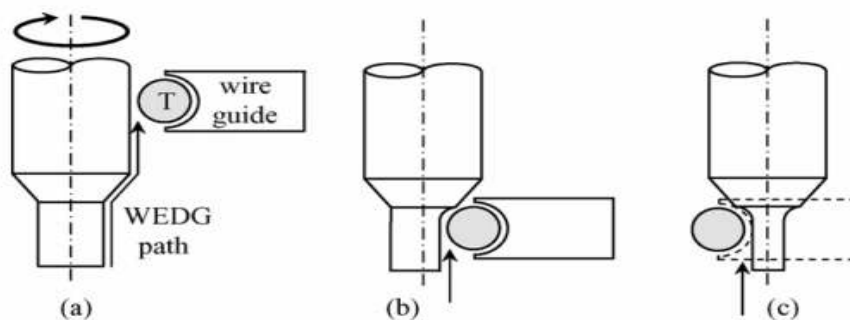
Η βασική αρχή της μεθόδου απεικονίζεται στην Εικόνα 2. Η ηλεκτρική εκκένωση εμφανίζεται μεταξύ του κινούμενου καλωδίου και του ηλεκτροδίου, τα οποία

χωρίζονται από διηλεκτρικό μέσο. Το καλώδιο κινείται μέσα στον οδηγό του με ταχύτητα 5 έως 10 mm/min, ενώ το ηλεκτρόδιο περιστρέφεται με ταχύτητα 3000 rpm.



Εικόνα 2, αρχή λειτουργίας της μεθόδου WEDG [Morg03]

Στην παραπομπή [Cher06] παρουσιάζεται η διαδικασία κατασκευής ενός μικροεργαλείου με διάμετρο 100 μm , η οποία ολοκληρώνεται σε τρεις φάσεις (Εικόνα 3α). Αρχικά το κομμάτι διαμορφώνεται μέσω της παραπάνω μεθόδου σε προσωρινό σχήμα και διάσταση. Έπειτα η περιστροφή του ηλεκτροδίου σταματά και το μικροεργαλείο διαμορφώνεται από την μια του πλευρά. Έπειτα το κινούμενο καλώδιο μετακινείται στην απέναντι πλευρά του ηλεκτροδίου, ώστε να διαμορφώσει το εργαλείο και από την άλλη πλευρά. Με αυτή την μέθοδο μπορεί συνεπώς να κατασκευαστεί μικροσκοπικό εργαλείο.

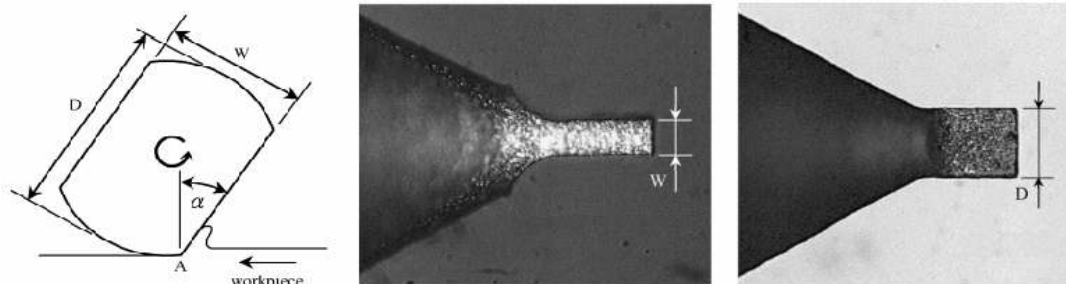


Εικόνα 3, κατασκευαστική διαδικασία μικροεργαλείου μέσω WEDG [Cher06]

Όπως θα παρατηρήσει κανείς, η γεωμετρία του εργαλείου αυτού είναι πολύ απλή. Είναι έτσι σχεδιασμένο ώστε η διεξαγωγή μια μικροεπεξεργασίας να είναι εφικτή. Το εργαλείο που παράγεται είναι σε θέση αφαιρεί υλικό με δύο τρόπους, τόσο μέσω φρεζαρίσματος, όσο και μέσω λείανσης. Η επιφάνεια του εργαλείου εμφανίζει μικροσκοπικές ανωμαλίες, οι οποίες δημιουργούνται λόγω της μεθόδου Mikro-EDM.

Οι ανωμαλίες αυτές επιτρέπουν στο εργαλείο να λειτουργεί μεταξύ άλλων και σαν εργαλείο λείανσης. Αν ληφθεί υπόψη ότι το μικροεργαλείο περιλαμβάνει και δύο κοπτικές ακμές τότε αυτό μπορεί να θεωρηθεί και σαν εργαλείο φρεζαρίσματος. Τέλος σύμφωνα με την παραπομπή [Cher06], το υλικό κατασκευής τέτοιου είδους εργαλείων δεν ξεπερνά τα 3 USD.

Στην Εικόνα 4 εμφανίζεται η διαδικασία κοπής καθώς και η πλάγια όψη ενός εργαλείου που παράχθηκε με την παραπάνω μέθοδο διαστάσεων $D=100\ \mu\text{m}$ και $W=40\ \mu\text{m}$.



Εικόνα 4, πλάγια όψη ενός μικροεργαλείου [Cher06]

Με αυτή την μέθοδο κατασκευάστηκε επίσης εργαλείο διαστάσεων $D=31\ \mu\text{m}$ και $W=18\ \mu\text{m}$, η εφαρμογή του οποίου επάνω σε υλικό Al 6061-T6 έδειξε ότι πλάτος του αυλακιού που διαμορφώθηκε ήταν κατά 14,5 % μεγαλύτερο από την διάμετρο του εργαλείου. Αυτό φανερώνει ότι το σφάλμα διαστάσεων είναι ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα. [Cher06]

Ανακεφαλαιώνοντας, μπορούμε να πούμε ότι η μέθοδος WEDG εμφανίζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα :

- υψηλή ακρίβεια διαμόρφωσης
- καλή ποιότητα επιφανείας,
- η επεξεργασία σκληρών μεταλλικών υλικών είναι επίσης δυνατή,

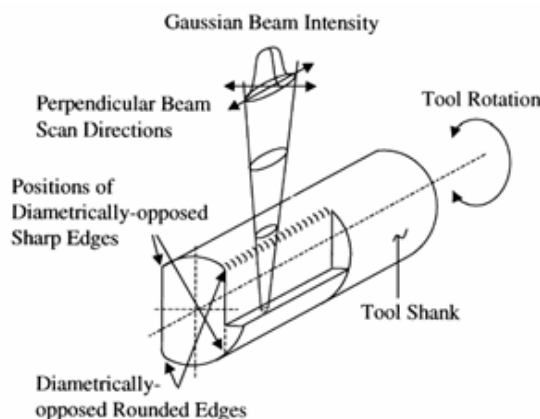
Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι :

- χαμηλή παραγωγικότητα,
- μόνο τα αγώγιμα υλικά είναι κατάλληλα,
- μεγάλοι χρόνοι επεξεργασίας.

3.1.2 Εστιασμένες δέσμες ιόντων (FIB)

Οι εστιασμένες δέσμες ιόντων είναι μια διαδικασία για την επεξεργασία δομών με εξαιρετικά λεπτομερή χαρακτηριστικά. Τα ιόντα προέρχονται από μια πηγή πλάσματος και κατευθύνονται στην επιφάνεια του επεξεργαζόμενου κομματιού, όπου εκεί καταφέρνουν και αφαιρούν μικρές ποσότητες υλικού. Στην παραπομπή [Alti03] αναφέρεται ότι το μέγεθος των σημείων που αφαιρούνται είναι της τάξης των 10 με 50 nm. Συνεπώς, παρόλο που μέσω της μεθόδου αυτής μπορούν να κατασκευάζονται τρισδιάστατες μορφές, ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού είναι της τάξης των μερικών $\mu\text{m}^3/\text{s}$ και άρα πολύ μικρός.

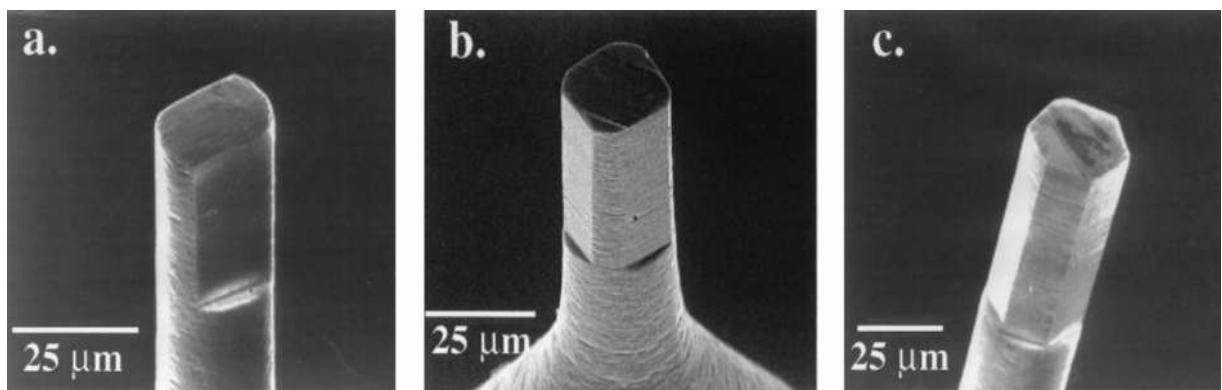
Ο David P. Adams και η ομάδα του χρησιμοποίησαν εστιασμένες δέσμες ιόντων [Adam00] για να κατασκευάσουν μια μεγάλη γκάμα μικροσκοπικών εργαλείων. Χρησιμοποίησαν την τεχνολογία αυτή γιατί είναι δυνατή η κατασκευή μιας μεγάλης ποικιλίας σχημάτων, καθώς και ότι προσφέρει εξαιρετικά αιχμηρές κοπτικές ακμές. Πρόκειται για μέθοδο που ελέγχεται πολύ εύκολα εξαιτίας της μεγάλης ακρίβειας της κατευθυνόμενης δέσμης. Ένα επίσης μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι οι πηγές ιόντων και οι φακοί εστίασης και απόκλισης της δέσμης είναι πολύ σταθεροί για εκατοντάδες ώρες λειτουργίας. Τέλος κατά την μέθοδο αυτή δεν επιδρά σχεδόν καμία δύναμη επάνω στο τεμάχιο και συνεπώς μπορεί να επιτευχθεί μια πολύ υψηλή ακρίβεια. [Adam00]



Εικόνα 5, κατασκευή μικροεργαλείου φρεζαρίσματος μέσω μεθόδου FIB [Adam00]

Στην Εικόνα 5 απεικονίζεται η διαδικασία κατασκευής ενός μικροεργαλείου φρεζαρίσματος. Στο εργαλείο διαμορφώνονται δύο επιφάνειες με συνολικά 4 ακμές. Οι ακμές που κατά τη διάρκεια της διαδικασίας διαμόρφωσης βρίσκονται κοντινότερα στην πηγή ιόντων εμφανίζουν σχετικά μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας ($R_c \approx 1.0\mu\text{m}$), ενώ οι απέναντι ακμές λόγω της σκίασης που προσφέρει ο άξονας του εργαλείου

είναι εξαιρετικά αιχμηρές ($R_c \leq 0.1 \mu m$). Με αυτή την διαδικασία μπορούν να παραχθούν αρκετές επιφάνειες και αντίστοιχα ακμές. Ο αριθμός και η θέση των επιφανειών επάνω στο εργαλείο καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του, όπως για παράδειγμα την απόσταση για την αφαίρεση μιας μικροποσότητας υλικού ή την φορά περιστροφής του εργαλείου κατά το φρεζάρισμα. Στην Εικόνα 6 εμφανίζονται τρία εργαλεία φρεζαρίσματος με 2, 4 και 6 επιφάνειες αντίστοιχα, οι οποία παρήχθησαν μέσω διαδικασίας FIB. Η κατασκευή ενός εργαλείου διαρκεί 2 με 3 ώρες και εξαρτάται τόσο από τον αριθμό των επιφανειών, όσο και από το υλικό. Ένα εργαλείο με πολλές επιφάνειες χρειάζεται μικρότερο χρόνο να παραχθεί διότι απαιτούνται να αφαιρεθούν μικρότερες ποσότητες υλικού. [Adam00]



Εικόνα 6, μικροεργαλεία φρεζαρίσματος με 2, 4 και 6 επιφάνειες [Adam00]

Τα παραπάνω εργαλεία είναι σε θέση να δημιουργήσουν αυλάκια σε υλικά όπως PMMA, 6061-T4 αλουμίνιο, ορείχαλκο και χάλυβα 4340. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το πλάτος των αυλακιών ήταν μεγαλύτερο κατά $2 \mu m$ (8,3%) από την διάμετρο του εργαλείου ($24 \mu m$), ενώ η τραχύτητα των αυλακώσεων κυμαινόταν μεταξύ 100 και 200 nm. Επιπλέον υπολογίστηκε ότι ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού για έναν άξονα από καρβίδιο του βολφραμίου C2 ήταν περίπου $0.76 \mu m^3/sec$. [Adam00]

Κλείνοντας, η παραπάνω μέθοδος εμφανίζει τα εξής πλεονεκτήματα :

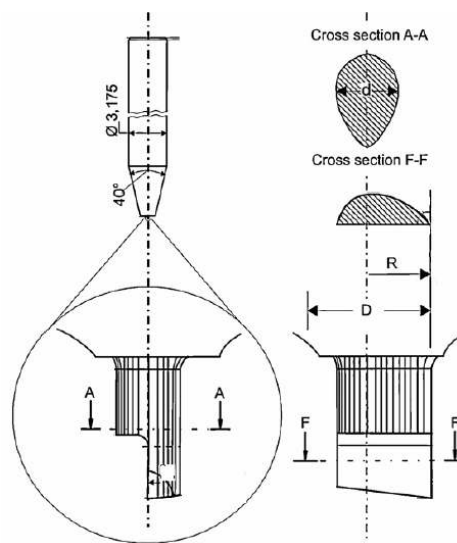
- μέθοδος αφαίρεσης υλικού χωρίς επαφή,
- εξαιρετικά υψηλή ανάλυση,
- μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε υλικό

Μειονεκτήματα της μεθόδου είναι :

- απαιτούνται μη συμβατικές συσκευές όπως θάλαμοι κενού, κ.α.
- πολύ χαμηλός ρυθμός αφαίρεσης υλικού.

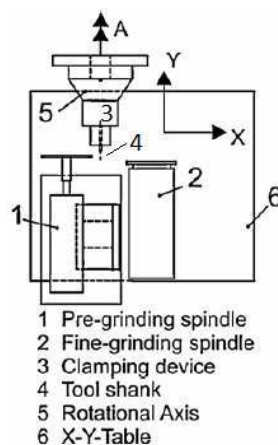
3.1.3 Λείανση

Η λείανση είναι μια διαδικασία κατά την οποία υλικό της επιφάνειας ενός κομματιού αφαιρείται μέσω της επίδρασης ενός λειαντικού δίσκου. Χρησιμοποιείται από αρκετές διαδικασίες παραγωγής διότι πετυχαίνει μια πολύ καλή ποιότητα επιφανείας και έτσι το αντικείμενο παραμένει εντός προκαθορισμένων ανοχών. Κατά κανόνα είναι ιδανική μέθοδος για την επεξεργασία πολύ σκληρών υλικών σε σχέση με την αντίστοιχη κατεργασία με εργαλεία που διαθέτουν κοπτικές ακμές. Εκτός από τα παραπάνω, η μέθοδος αυτή ήταν μέχρι πρόσφατα πρακτικά η μοναδική μέθοδος που μπορούσε να επεξεργαστεί τέτοιου είδους υλικά.



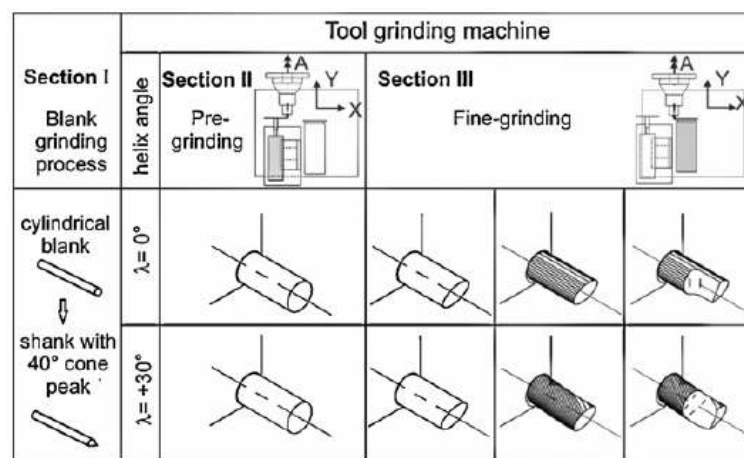
Εικόνα 7, γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός μικροεργαλείου φρεζαρίσματος [Auri12]

Στην παραπομπή [Auri12], ο Jan C. Aurich και η ομάδα του ανέπτυξαν και κατασκεύασαν μέσω διαδικασίας λείανσης ένα γεωμετρικά ιδανικό μικροεργαλείο. Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου φρεζαρίσματος απεικονίζονται στην Εικόνα 7.



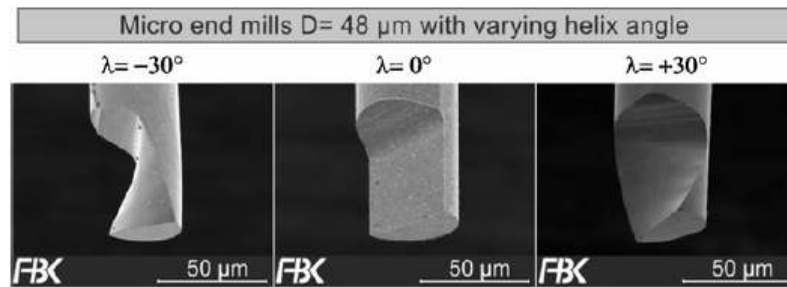
Εικόνα 8, σκαρίφημα μηχανής λείανσης τριών αξόνων [Auri12]

Η βασική ιδέα ήταν να κατασκευαστεί εργαλείο φρεζαρίσματος μιας κοπτικής ακμής από καρβίδιο του βολφραμίου. Η συγκεκριμένη μορφή που επιλέχθηκε μπορεί να υλοποιηθεί ακόμη και σε μικροσκοπικές διαστάσεις και μπορεί να κατεργαστεί μια μεγάλη γκάμα υλικών. Η διαδικασία κατασκευής εκτελείται πάνω σε φορητή εργαλειομηχανή λείανσης τριών αξόνων. Στην Εικόνα 8 εμφανίζεται το σκαρίφημα μηχανής με δύο δίσκους λείανσης, οι οποίοι είναι στερεωμένοι επάνω σε τραπέζι δύο αξόνων. Το τραπέζι διαθέτει ανάλυση 0,1 μm και ακρίβεια επαναληψιμότητας 1 μm , ενώ η εκκεντρότητα του υποδοχέα του εργαλείου είναι μικρότερη των 0,65 μm . Η διαδικασία κατασκευής του εργαλείου φρεζαρίσματος αποτελείται από τρεις φάσεις (Εικόνα 9). [Auri12]



Εικόνα 9, διαδικασία κατασκευής μικροεργαλείου φρεζαρίσματος μέσω λείανσης [Auri12]

Η πρώτη φάση εκτελείται σε ξεχωριστή μηχανή, ενώ οι φάσεις 2 και 3 εκτελούνται στην προαναφερόμενη μηχανή. Κατά την πρώτη φάση δημιουργείται στο αρχικό κομμάτι μια κορυφή με γωνία 40 μοιρών. Στην δεύτερη φάση τοποθετείται το εργαλείο στον άξονα A της εργαλειομηχανής και εκτελείται προλείανση. Στην φάση αυτή χρησιμοποιείται χοντρόκοκκος λειαντικός δίσκος με μεγάλο ρυθμό αφαίρεσης υλικού για να κατασκευάσει κυλινδρική επιφάνεια. Στην 3^η φάση χρησιμοποιείται λειαντικός δίσκος με μέγεθος κόκκου 1 μm , ο οποίος περιστρέφεται με την βοήθεια ατράκτου που εδράζεται σε ρουλεμάν αέρος. Το βήμα αυτό είναι καθοριστικό για μια πολύ καλή ποιότητα επιφάνειας και μεγάλη ακρίβεια. Στην επόμενη φωτογραφία απεικονίζεται εργαλείο διαμέτρου 48 μm . Η γωνία κλίσης της κοπτικής ακμής μπορεί να είναι αρνητική, θετική ή μηδενική.



Εικόνα 10, μικροεργαλείο φρεζαρίσματος με 3 διαφορετικές γωνίες κλίσης [Auri12]

Με αυτή την διαδικασία μπορούν να κατασκευαστούν εργαλεία διαμέτρου 10 μm , με ακτίνα καμπυλότητας κοπτικής ακμής μικρότερη του 0,1 μm , σε χρόνο μικρότερο των 10 λεπτών. Πρόκειται επομένως για μια πολύ αποδοτική μέθοδο. Η πολύ μικρή καμπυλότητα της κοπτικής ακμής έχει ως αποτέλεσμα πολύ χαμηλές δυνάμεις κοπής. [Auri12]

3.2 Δομικά στοιχεία των εργαλειομηχανών

3.2.1 Οδηγοί και έδραση

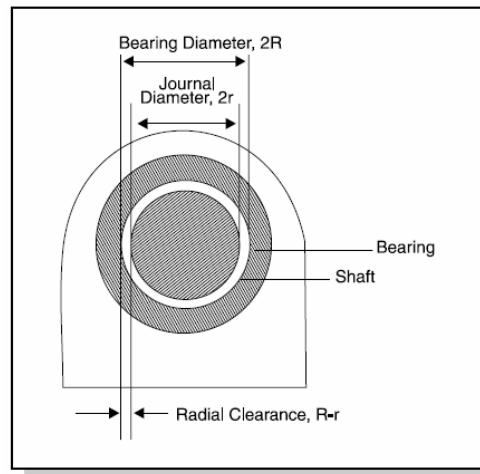
Στις εργαλειομηχανές απαιτείται σχεδόν πάντα η γραμμική μετακίνηση του εργαλείου ή του κομματιού. Η κίνηση αυτή επιτυγχάνεται μέσω των οδηγών. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι οδηγών : Οδηγοί με γλίστρες και οδηγοί με ρουλεμάν. [Uria09, Alti11, Venk07]

3.2.1.1 Οδηγοί με γλίστρες

Οι οδηγοί αυτοί διαθέτουν πολύ καλά χαρακτηριστικά όπως υψηλή απόσβεση, αντοχή σε κρουστικά φορτία καθώς και μεγάλη ικανότητα φόρτισης. Χρησιμοποιούνται γενικά για ταχύτητες κάτω των 0,5 m/s [Alti11] και χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες [Venk07] :

Υδροδυναμικοί

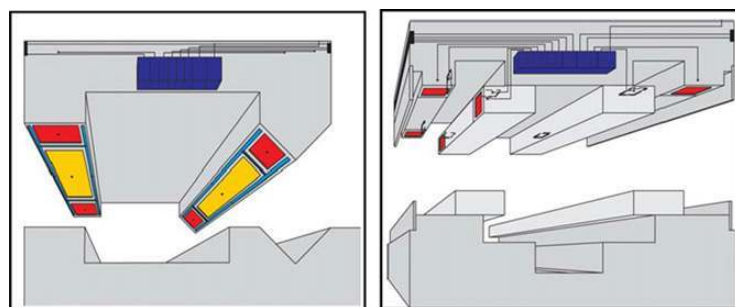
Στους οδηγούς αυτούς, οι επιφάνειες έδρασης χωρίζονται μεταξύ τους διαρκώς από λιπαντικό υγρό. Το εφαρμοζόμενο φορτίο υποστηρίζεται εξολοκλήρου από την πίεση του λιπαντικού φιλμ, η οποία δημιουργείται από την σχετική κίνηση των επιφανειών. Οι απώλειες τριβής εμφανίζονται μόνο στο εσωτερικό του λιπαντικού φιλμ και συνεπώς δεν παρατηρείται φθορά μεταξύ των επιφανειών. Το πάχος τους λιπαντικού φιλμ κυμαίνεται μεταξύ 0,008 mm και 0,02 mm ενώ ο συντελεστής τριβής μεταξύ 0,001 και 0,005. [Venk07]



Εικόνα 11, υδροδυναμικός οδηγός [Venk07]

Υδροστατικοί

Οι επιφάνειες έδρασης χωρίζονται μεταξύ τους από κελιά που περιλαμβάνουν λάδι υπό πίεση. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται το φαινόμενο Stick-Slip. Η διαφορά πίεσης μεταξύ του κελιού και της ατμοσφαιρική ονομάζεται πίεση κελιού. Οι οδηγοί αυτοί περιλαμβάνουν συστοιχίες κελιών, έτσι ώστε να εξισορροπούνται ροπές και ασύμμετρες δυνάμεις που επιδρούν στους οδηγούς. Κάθε κελί τροφοδοτείται με διαφορετική πίεση, ανάλογα πάντα με τις δυνάμεις που δέχεται. Κατά κανόνα χρησιμοποιείται μια και μοναδική αντλία η οποία συνοδεύεται από διάφορους περιοριστές πίεσης, έτσι ώστε κάθε κελί να τροφοδοτείται από την αντίστοιχη πίεση. [Alti11]



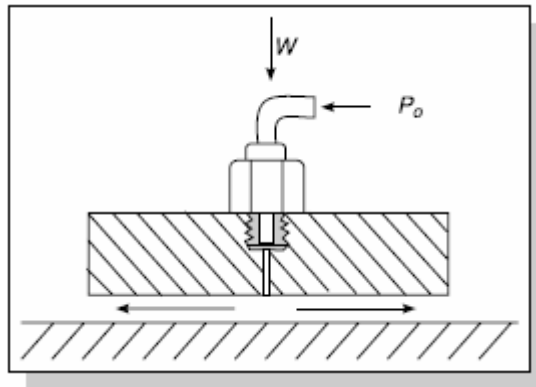
Εικόνα 12, υδροστατικοί οδηγοί [Alti11]

Αεροδυναμικοί

Οι αεροδυναμικοί οδηγοί λειτουργούν εξαρτώμενοι από την σχετική κίνηση μεταξύ των επιφανειών που εδράζονται. Η κίνηση αυτή είναι παρόμοια με την υδρολίσθηση που συμβαίνει όταν ένα όχημα που κινείται με μεγάλη ταχύτητα περάσει πάνω από συγκεντρωμένα νερά, κατά την οποία το φιλμ του νερού δεν διασπάται. Σε χαμηλές ταχύτητες αντιθέτως το λάστιχο εισχωρεί στο φιλμ του νερού. Όταν δηλαδή η σχετική ταχύτητα είναι μικρή ή μηδενική, τότε έρχονται σε άμεση επαφή οι επιφάνειες έδρασης. Οι αεροδυναμικοί τύποι οδηγών είναι συνήθως πολύ απλοί, διότι είναι ανεξάρτητοι από μηχανισμούς ή αντλίες που δημιουργούν πίεση. Εξαιτίας του γεγονότος ότι στον τύπο αυτό οι επιφάνειες έδρασης απαιτούν μεγάλη ακρίβεια και μικρή επιβάρυνση σε φορτίο, η χρησιμοποίηση των οδηγών αυτών είναι περιορισμένη. Επίσης δεν είναι σε καμία περίπτωση κατάλληλοι για εφαρμογές όπου απαιτούνται συχνές εκκινήσεις και σταματήματα ή όταν υπάρχουν πολλές εναλλαγές στην κατεύθυνση κίνησης των οδηγών. Ωστόσο οι αεροδυναμικοί οδηγοί είναι πιο απλοί στην κατασκευή τους και πιο οικονομικοί στην λειτουργία τους σχετικά με τα αεροστατικά συστήματα λίπανσης. [Uria09]

Αεροστατικοί

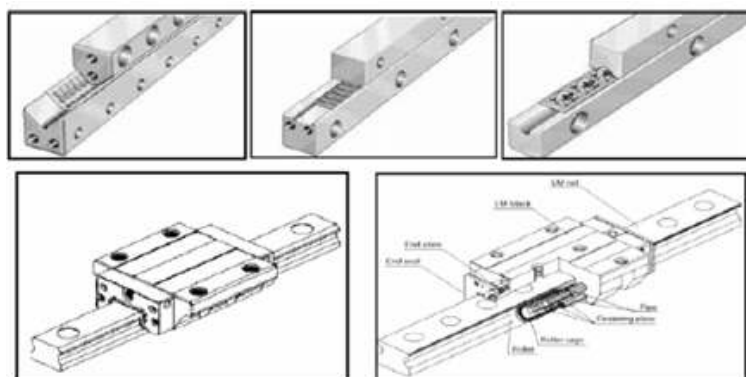
Σε αντίθεση με τους αεροδυναμικούς οδηγούς, οι αεροστατικοί οδηγοί μπορούν να μεταφέρουν φορτίο ακόμη και όταν βρίσκονται σε ακινησία. Τα ρουλεμάν αέρος προσφέρουν λύσεις για πολλές εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας, όπου η υψηλή απόδοση και ακρίβεια προαπαιτούνται. Οι οδηγοί αυτοί απαιτούνε όμως μια εξωτερική παροχή πίεσης. Ο συμπιεσμένος αέρας οδηγείται μεταξύ των επιφανειών έδρασης μέσω οπών μεγάλης ακρίβειας και εξέρχεται από αυτές μέσω καναλιών (Εικόνα 13). Αν επιλεγθεί η κατάλληλη μορφή οδηγών, μπορεί να επιτευχθεί μια ισχυρή ακαμψία καθώς και να υποστηριχτεί σχετικά μεγάλο φορτίο. Επειδή ο αέρας διαθέτει πολύ χαμηλό ιξώδες, πρέπει οι σχισμές που διέρχεται να είναι σε πάχος πολύ λεπτές και μάλιστα της τάξης των 1 έως 10 μm . Επειδή οι έδραση πραγματοποιείται επάνω σε λεπτό στρώμα αέρα, η εμφανιζόμενη τριβή και φθορά είναι αμελητέες και σε κατάσταση ηρεμίας μηδενικές. [Uria09]



Εικόνα 13, αρχή λειτουργίας αεροστατικού οδηγού [Uria09]

3.2.1.2 Οδηγοί με ρουλεμάν

Οδηγοί με ανακυκλούμενα ή χωρίς ανακυκλούμενα σφαιρίδια (Εικόνα 14) χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές. Οδηγοί με ανακυκλούμενα σφαιρίδια χρησιμοποιούνται πιο συχνά όταν η διαδρομή κίνησης του οδηγού είναι σχετικά μεγάλη, ενώ οι οδηγοί χωρίς ανακυκλούμενα σφαιρίδια προτιμώνται σε μικρές διαδρομές. Εκτός από σφαιρίδια οι οδηγοί αυτοί μπορούν να χρησιμοποιούν, ανάλογα με την εφαρμογή, και κυλινδρικά ή βελονοειδή σώματα. Ειδικά «κλουβιά» συγκράτησης των σωμάτων χρησιμοποιούνται μεταξύ των κινούμενων και μη κινούμενων τμημάτων των οδηγών και βρίσκονται πάντα σε προένταση. Κύρια χαρακτηριστικά τους είναι η μειωμένη τριβή, υψηλή ανθεκτικότητα σε φορτία, υψηλή ακαμψία, μειωμένος βαθμός απόσβεσης και σχετικά μεγάλο ύψος. [Alti11]



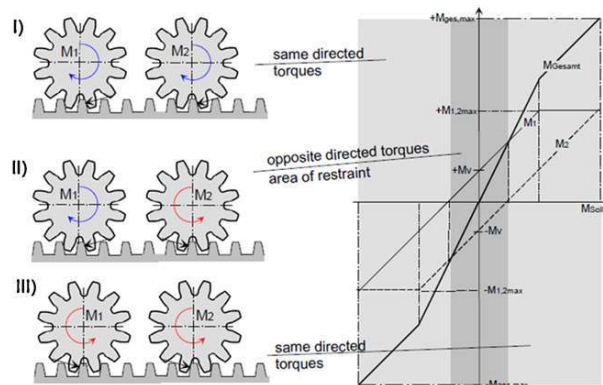
Εικόνα 14, διαφορετικοί τύποι οδηγών με ρουλεμάν [Alti11]

3.2.2 Μηχανισμοί μετάδοσης κίνησης

Σκοπός των μηχανισμών αυτών είναι η μετάδοση της κίνησης από τον κινητήρα στο εργαλείο ή στο κατεργαζόμενο κομμάτι. Στις περισσότερες μηχανές συναντάται το σύστημα του ατέρμονα κοχλία, του οποίου η βελτιωμένη μορφή περιλαμβάνει και ανακυκλούμενα σφαιρίδια. Για τις μηχανές υψηλής και πολύ υψηλής ακρίβειας είναι περισσότερο κατάλληλα τα γραμμικά μοτέρ ή οι μηχανισμοί μετάδοσης μέσω τριβής. [Uria09, Alti11, Venk07]

3.2.2.1 Σύστημα οδοντωτού κανόνα - γραναζιού

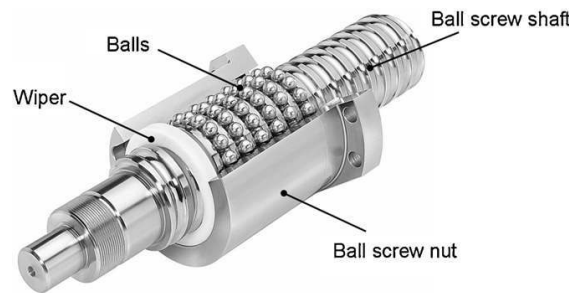
Τα συστήματα οδοντωτού κανόνα – γραναζιού χρησιμοποιούνται συνήθως όπου απαιτούνται μεγάλες διαδρομές κίνησης. Η μετάδοση της κίνησης χαρακτηρίζεται από μια πολύ αργή κίνηση του οδοντωτού τροχού καθώς και από υψηλή ροπή. Για να εξασφαλιστεί όσο το δυνατόν μικρότερο παίξιμο (τζόγος) στην μετάδοση της κίνησης, χρησιμοποιούνται συχνά δύο οδοντωτοί τροχοί με ανεξάρτητους κινητήρες, οι οποίοι αν ελεγχθούν κατάλληλα μπορούν να θέσουν το σύστημα σε προένταση (Εικόνα 15) και παράλληλα να εξαφανίσουν τον τζόγο. [Alti11]



Εικόνα 15, σύστημα οδοντωτού κανόνα – γραναζιού με ηλεκτρική προένταση [Alti11]

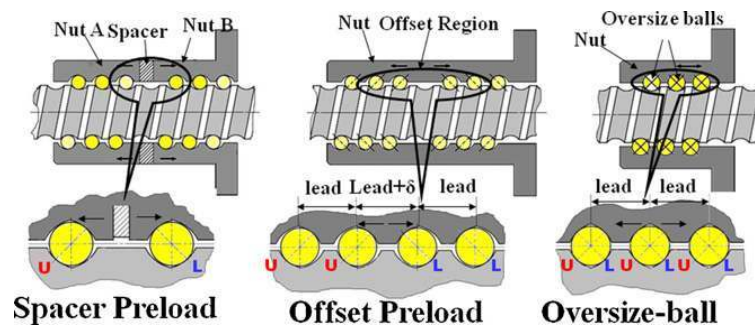
3.2.2.2 Ατέρμονας με ανακυκλοφορούντα σφαιρίδια

Ο ατέρμονας με ανακυκλοφορούντα σφαιρίδια είναι το πιο συχνό σύστημα μετάδοσης κίνησης στις εργαλειομηχανές. Χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό απόδοσης (95-98 %), το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την μειωμένη παραγωγή θερμότητας, μειωμένη φθορά, μεγάλη διάρκεια ζωής και απουσία του Stick-Slip φαινομένου [Alti11]. Αποτελείται από τον ατέρμονα κοχλία και από το αντίστοιχο παξιμάδι με ανακυκλούμενα σφαιρίδια (Εικόνα 16).



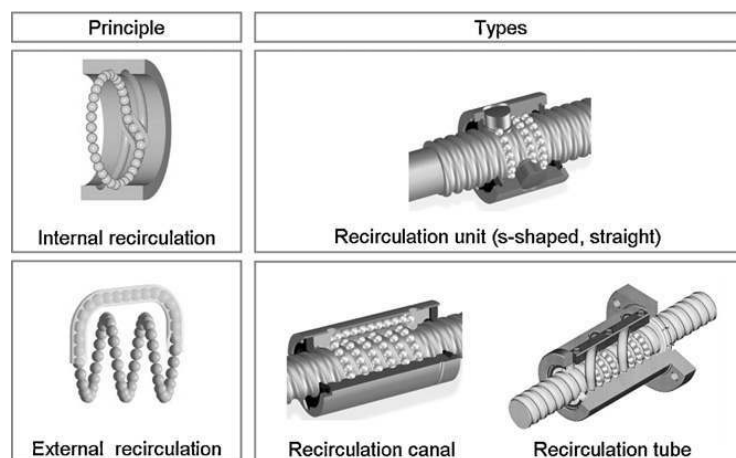
Εικόνα 16, ατέρμονας με ανακυκλούμενα σφαιρίδια [Alt11]

Το παξιμάδι είναι συνήθως συνδεδεμένο με το τραπέζι ενώ ο ατέρμονας συνδέεται είτε απευθείας στον κινητήρα είτε σε κάποιο άλλο σύστημα μετάδοσης κίνησης. Το παξιμάδι έρχεται σε προένταση είτε μέσω ρύθμισης της απόστασης όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα αριστερά, είτε μέσω σφαιριδίων μεγαλύτερων διαστάσεων όπως φαίνεται στα δεξιά του σχήματος. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται ο μηδενισμός του αθέμιτου παιξίματος μεταξύ των κινούμενων μερών.



Εικόνα 17, προένταση του ατέρμονα με ανακυκλούμενα σφαιρίδια [Alt11]

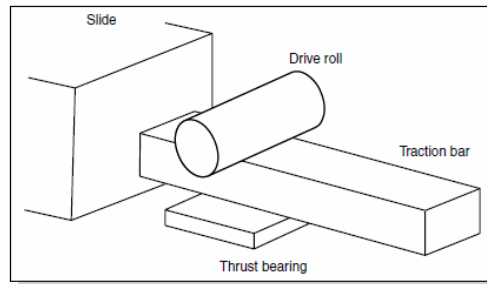
Στην Εικόνα 18 παρουσιάζονται δύο τύποι ατέρμονων με ανακυκλοφορούμενα σφαιρίδια, με εσωτερική και εξωτερική ανατροφοδότηση.



Εικόνα 18, είδη ατέρμονα με ανακυκλούμενα σφαιρίδια [Alt11]

3.2.2.3 Μετάδοση μέσω τριβής

Η μετάδοση μέσω τριβής είναι μια εναλλακτική πρόταση στο σύστημα ατέρμονα κοχλία με ανακυκλοφορούμενα σφαιρίδια. Πετυχαίνουν μια ευθύγραμμη μετακίνηση μέσω της πίεσης ενός ασαλένιου κυλίνδρου επάνω σε ασαλένια ράβδο. Όταν ο κύλινδρος περιστρέφεται, η ράβδος κινείται ευθύγραμμα προς την αντίστοιχη κατεύθυνση. Η αρχή λειτουργίας απεικονίζεται στην Εικόνα 19. [Venk07]

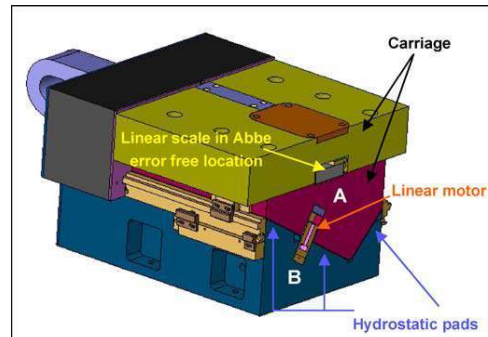


Εικόνα 19, μετάδοση μέσω τριβής [Venk07]

Η τεχνική αυτή εμφανίζει ωστόσο ορισμένα μειονεκτήματα, όπως μειωμένος βαθμός απόσβεσης και μειωμένη ικανότητα φόρτισης. Για την αύξηση της δύναμης πρόωσης απαιτείται πρώτα η αύξηση της προέντασης μεταξύ του κυλίνδρου και της ράβδου. Η τελευταία ενέργεια όμως μπορεί να προκαλέσει παραμόρφωση των εμπλεκόμενων εξαρτημάτων. [Venk07]

3.2.2.4 Απευθείας κίνηση μέσω γραμμικού κινητήρα

Ένας γραμμικός κινητήρας μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα περιστροφικός ηλεκτροκινητήρας, ο οποίος έχει κοπεί κατά τον άξονά του, έχει ξετυλιχτεί και τεντωθεί.



Εικόνα 20, γραμμικός κινητήρας [Uria09]

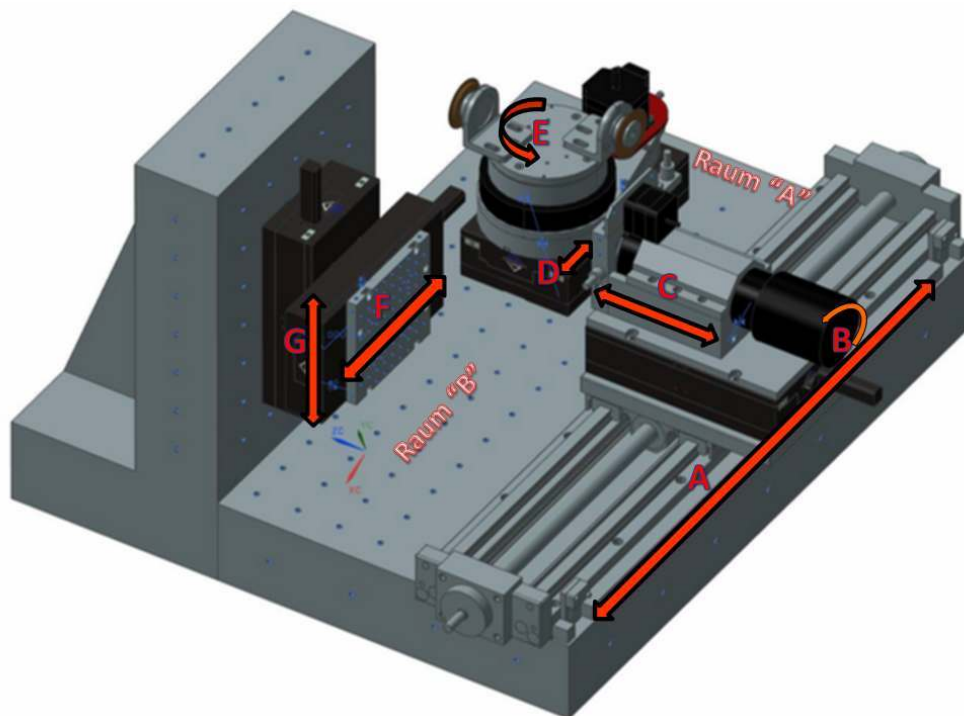
Η χρησιμοποίηση των γραμμικών κινητήρων παρουσιάζει τα εξής χαρακτηριστικά [Uria09] :

- Η ακρίβεια, η ανάλυση και η επαναληψιμότητα των κινούμενων μερών καθορίζονται μέσω τους συστήματος μέτρησης.
- Σχετικά με την ακαμψία κατά την φορά κίνησης, οι γραμμικοί κινητήρες δεν εισάγουν καμία απολύτως ελαστικότητα στο σύστημα διότι η κίνηση δίδεται απευθείας και δεν υπάρχουν επιπλέον εξαρτήματα. Στην περίπτωση των περιστροφικών κινητήρων αντιθέτως απαιτούνται επιπλέον εξαρτήματα τα οποία μετατρέπουν την περιστροφική κίνηση σε ευθύγραμμη.
- Λόγω το ότι δεν υπάρχουν εξαρτήματα μετάδοσης κίνησης δεν εμφανίζονται τζόγοι και φθορές.
- Για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας η χρήση ενός γραμμικού κινητήρα δίχως σίδηρο είναι η καλύτερη επιλογή, διότι στην περίπτωση αυτή δεν εμφανίζονται ελκτικές δυνάμεις.

4 Περιγραφή της νέας μηχανής

Το σχέδιο της νέας μηχανής φαίνεται στην Εικόνα 21. Τα κόκκινα βέλη συμβολίζουν τις γραμμικές και περιστροφικές κινήσεις των διαφόρων εξαρτημάτων. Η κατασκευή περιλαμβάνει συνολικά 5 γραμμικούς και 2 περιστροφικούς άξονες υψηλής ακρίβειας.

Ο γραμμικός οδηγός A μεταφέρει το υπό κατασκευή εργαλείο κατά μήκος της μηχανής, η οποία χωρίζεται σε δύο βασικά τμήματα. Στο τμήμα A (Raum A) λαμβάνει χώρα η κατασκευή του εργαλείου ενώ στο τμήμα B (Raum B) γίνεται η κατεργασία του κομματιού. Ο οδηγός A μεταφέρει την άτρακτο του εργαλείου από τον χώρο A στον χώρο B. Η διαδρομή αυτή είναι σχετικά μεγάλη και γενικά το κόστος ενός αντίστοιχου οδηγού κοστίζει πολλά χρήματα. Στην περίπτωση μας όμως χρησιμοποιήθηκε οδηγός γλίστρας σε συνδυασμό με ατέρμονα κοχλία και παξιμάδι ανατροφοδότησης σφαιριδίων (ακρίβεια $\pm 12\mu\text{m}$) και αυτό διότι η απαιτούμενη ακρίβεια για τον οδηγό αυτό δεν είναι υψηλή. Η κινητήρια δύναμη του οδηγού προέρχεται από βηματικό μοτέρ.



Εικόνα 21, σχέδιο της νέας μηχανής

Ο κινητήρας του περιστροφικού άξονα B (ταυτόχρονα και άξονας του μικροεργαλείου) εκτελεί δύο λειτουργίες. Από την μια πρέπει να εξασφαλίζει στο εργαλείο μια περιστροφική κίνηση υψηλής ακρίβειας κατά την διάρκεια της φάσης κατασκευής του εργαλείου και από την άλλη πρέπει να είναι ικανός, στην φάση

εφαρμογής και κατεργασίας του κομματιού να παρέχει στο εργαλείο έναν υψηλό ρυθμό περιστροφής (τουλάχιστον 120K rpm).

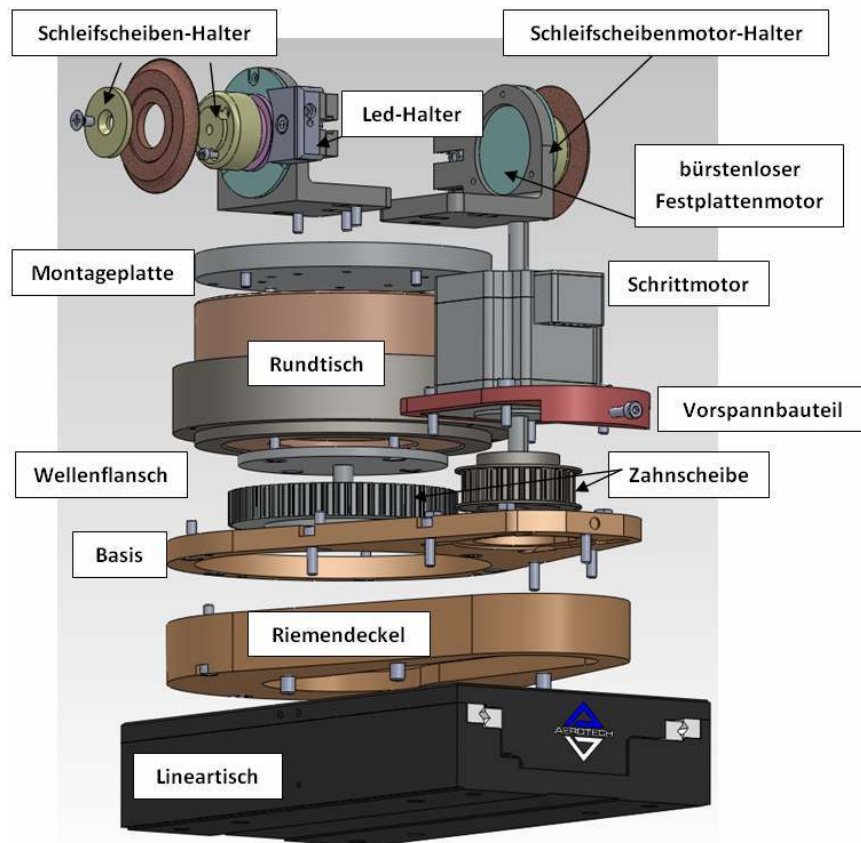
Ο γραμμικός άξονας C μετακινεί το εργαλείο και το φέρνει σε επαφή, είτε με τους δίσκους λείανσης (Raum A), είτε με κατεργαζόμενο κομμάτι (Raum B). Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει η κίνηση να είναι υψηλής ακρίβειας ($\pm 250\text{nm}$). Μια σχετικά οικονομική λύση για την συγκεκριμένη εφαρμογή είναι οι οδηγοί Cross Roller σε συνδυασμό με γραμμικό μοτέρ.

Οι άξονες D και E χρησιμοποιούνται για την μετακίνηση και τον προσανατολισμό των λειαντικών δίσκων. Λόγο το ότι οι άξονες αυτοί περιλαμβάνονται στους στόχους της παρούσας εργασίας, η λειτουργία τους θα εξηγηθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στο χώρο B πραγματοποιείται η χρήση του μικροεργαλείου και η κατεργασία του κομματιού. Για τον λόγο αυτό η χρήση ενός τραπεζιού δύο αξόνων είναι αναγκαία, επάνω στο οποίο θα στηρίζεται το κατεργαζόμενο κομμάτι. Η κίνηση επάνω στο επίπεδο θα πραγματοποιείται με μεγάλη ακρίβεια ακρίβειας ($\pm 250\text{nm}$). Οι άξονες λοιπόν C, F & G θα μπορούν να αποτελούν μια εργαλειομηχανή CNC υψηλής ακρίβειας.

5 Εξαρτήματα της κατασκευής

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται κάθε μεμονωμένο εξάρτημα της κατασκευής. Ορισμένα από αυτά βρίσκονται ήδη διαθέσιμα στο εργαστήριο της σχολής, μερικά θα πρέπει να επιλεγθούν από την αγορά και να αγοραστούν ενώ άλλα θα πρέπει να σχεδιαστούν και κατασκευαστούν στις εργαλειομηχανές του πανεπιστημίου. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται όλα τα εξαρτήματα που περιλαμβάνονται στην κατασκευή.



Εικόνα 22, εξαρτήματα της κατασκευής

5.1 Περιστροφικό τραπέζι

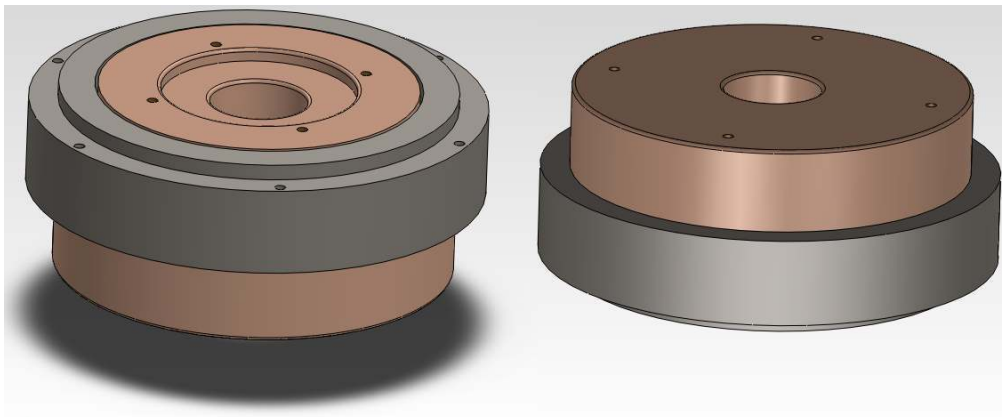
Το περιστροφικό τραπέζι είναι συνήθως τμήμα μιας εργαλειομηχανής, επάνω στο οποίο στερεώνονται κομμάτια προς κατεργασία. Αποτελείται από μια συμπαγής βάση και έναν ρότορα. Σε υψηλής ακρίβειας εφαρμογές χρησιμοποιούνται συνήθως υδροστατικά ή αεροστατικά ρουλεμάν.

Στο εργαστήριο παραγωγής του πανεπιστημίου υπάρχει διαθέσιμο ήδη ένα περιστροφικό τραπέζι αέρος της εταιρείας Firma LT Ultra (Εικόνα 23). Τα βασικά χαρακτηριστικά του τραπεζιού είναι : λειτουργία με σχεδόν καθόλου τριβή, απουσία φαινομένου Stick-Slip, μεγάλη ακαμψία και απόκλιση εκκεντρότητας < 50 nm.



Εικόνα 23, περιστροφικό τραπέζι της εταιρείας LT Ultra

Τα τρισδιάστατα σχέδια του τραπεζιού δεν ήταν διαθέσιμα και για τον λόγο αυτό έπρεπε να σχεδιαστούνε. Το CAD πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το SolidWorks 2011 της εταιρείας „Dassault Systèmes SolidWorks Corp.“ Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα σχέδια του τραπεζιού.



Εικόνα 24, τρισδιάστατα σχέδια περιστροφικού τραπεζιού

5.2 Γραμμικό τραπέζι

Για την γραμμική κίνηση του περιστροφικού τραπεζιού εξετάστηκαν δύο δυνατότητες. Η πρώτη ήταν η μελέτη και κατασκευή ενός γραμμικού τραπεζιού. Προϋποθέσεις για αυτό ήταν η κατάλληλη επιλογή ενός γραμμικού οδηγού, ενός κινητήρα και ενός συστήματος μέτρησης. Εξαιτίας της μεγάλης πολυπλοκότητας, η λύση αυτή απορρίφθηκε. Η δεύτερη δυνατότητα ήταν η επιλογή από την αγορά ενός έτοιμου προϊόντος το οποίο θα πληρούσε τις απαιτήσεις της κατασκευής. Στην αγορά υπάρχει μια μεγάλη πληθώρα γραμμικών τραπεζιών. Υψηλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα προσφέρουν τα αεροστατικά και υδροστατικά τραπέζια, τα οποία

όμως είναι και εξαιρετικά ακριβά. Ακολουθούν τα τραπέζια με Cross Roller οδηγούς. Μπορεί να εμφανίζουν ελαφρώς χειρότερα χαρακτηριστικά, είναι όμως αρκετά πιο προσιτά στην τιμή τους. Εξετάστηκαν διεξοδικά τα τεχνικά φυλλάδια διαφόρων εταιρειών (όπως SCHNEEBERGER Linear Technology, OWIS GmbH, ALIO GmbH, Aerotech Inc.) και διαπιστώθηκε ότι το γραμμικό τραπέζι Aerotech ANT130-110-L-PLUS (Εικόνα 26) πλήρη τις απαιτήσεις της εργασίας. Στην Εικόνα 25 εμφανίζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.

Model	ANT130-110-L-PLUS	
Travel	110 mm	
Accuracy ⁽¹⁾	±300 nm	
Resolution	1 nm	
Repeatability (Bidirectional) ⁽¹⁾	±75 nm	
Repeatability (Unidirectional)	±25 nm	
Straightness ⁽¹⁾	±1.0 μm	
Flatness ⁽¹⁾	±1.0 μm	
Pitch	10 arc sec	
Roll	10 arc sec	
Yaw	5 arc sec	
Maximum Speed	350 mm/s	
Maximum Acceleration	1 g (No Load)	
In-Position Stability ⁽²⁾	<1 nm	
Maximum Force (Continuous)	23 N	
Load Capacity ⁽³⁾	Horizontal	12.0 kg
	Side	10 kg
Moving Mass	1.9 kg	
Stage Mass	3.3 kg	

1. Certified with each stage.
2. In-Position Jitter listing is 3 sigma value.
3. Axis orientation for on-axis loading is listed.

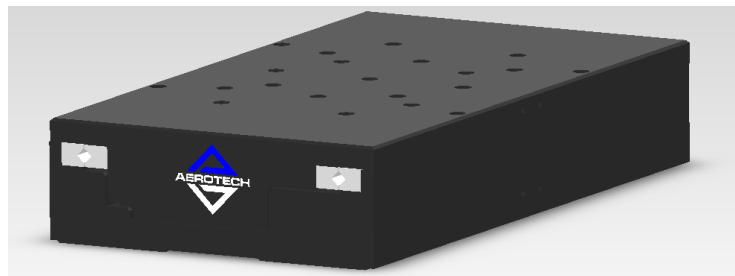
Εικόνα 25, τεχνικά χαρακτηριστικά του γραμμικού τραπεζιού [Aero14]

Το αναφερόμενο τραπέζι διαθέτει μεταξύ άλλων έναν γραμμικό κινητήρα άνευ ψηκτρών και ένα οπτικό σύστημα μέτρησης. Ελέγχεται με την βοήθεια του ελεγκτή NSTEP (Εικόνα 26) και από το λογισμικό "Automation 3200".



Εικόνα 26, Aerotech ANT130-110-L

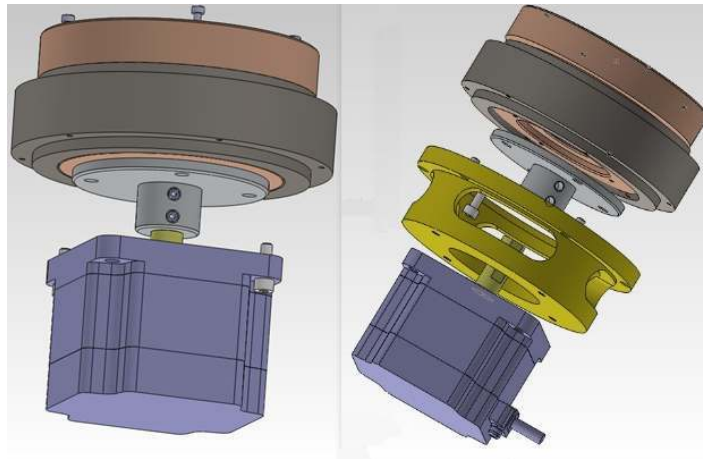
Τα τρισδιάστατα σχέδια του τραπέζιου διατίθενται από τον κατασκευαστή του και εμφανίζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 27, τρισδιάστατα σχέδια του τραπέζιου

5.3 Μετάδοση της ροπής

Η μετάδοση της ροπής από τον βηματικό κινητήρα στο περιστροφικό τραπέζι μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους. Η πρώτη λύση είναι η απευθείας σύνδεση, η οποία είναι μεν απλή στην υλοποίησή της, παρουσιάζει όμως ορισμένα μειονεκτήματα, όπως το σχετικά μεγάλο ύψος της τελικής κατασκευής (Εικόνα 28) και η χειρότερη ακρίβεια / ανάλυση της περιστροφικής κίνησης εξαιτίας της ένα προς ένα σχέσης μετάδοσης.



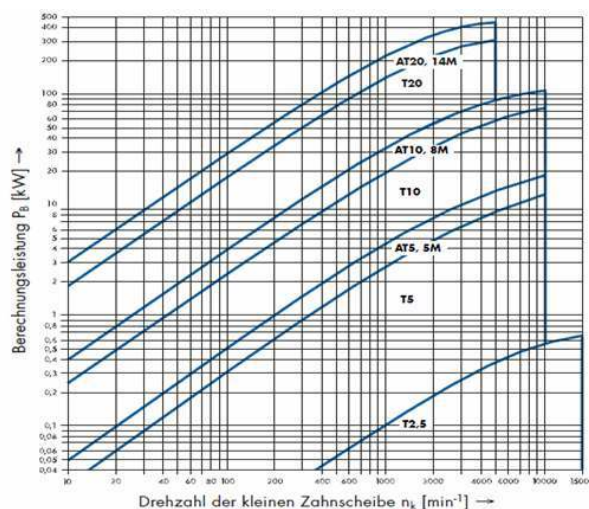
Εικόνα 28, πρώτη εναλλακτική λύση : απευθείας μετάδοση

Για να εξοικονομηθεί περισσότερος χώρος (κυρίως καθ' ύψος) και προκειμένου να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερη ανάλυση και ακρίβεια κατά την περιστροφή του τραπεζιού (επιλέχτηκε σχέση μετάδοσης ένα προς δύο), χρησιμοποιήθηκε μετάδοση με οδοντωτό ιμάντα. Η λύση αυτή προσφέρει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα :

- Συγχρονισμένη μετάδοση χωρίς καθόλου ολίσθηση
- Δεν απαιτεί συντήρηση (π.χ. λίπανση)
- Μικρό βάρος
- Δυνατότητα υψηλή ταχύτητας περιστροφής
- Βαθμός απόδοσης έως 99 % του ονομαστικού φορτίου

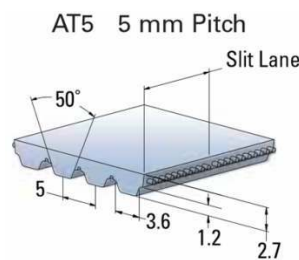
Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται τα βήματα υπολογισμού της ιμαντοκίνησης.

5.3.1 Επιλογή προφίλ του ιμάντα



Εικόνα 29, επιλογή προφίλ του ιμάντα [Opti13]

Για την ορθή επιλογή του προφίλ ιμάντα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το παραπάνω γράφημα. Στην περίπτωση μας η μεταδιδόμενη ισχύς υπολογίστηκε ότι είναι μικρότερη των 50 W και ο μέγιστος ρυθμός περιστροφής περίπου 120 rpm. Από το γράφημα προκύπτει ότι το προφίλ «T» είναι κατάλληλο για την εφαρμογή μας. Παρόλα αυτά επιλέχτηκε το βελτιωμένο προφίλ «AT» (δείτε επόμενη εικόνα) με βήμα οδόντωσης $p = 5\text{mm}$. Το προφίλ αυτό (σύμφωνα με την εταιρεία Gates [Gate11]) χρησιμοποιείται σε εφαρμογές με υψηλότερες απαιτήσεις μεταφοράς φορτίου και εμφανίζει μικρότερο τζόγο οδόντωσης. Είναι επίσης ιδανικό για γραμμικές κινήσεις υψηλής ακρίβειας.



Εικόνα 30, οδοντωτό προφίλ AT5 [Gate11]

5.3.2 Ακρίβεια μεταφοράς και ακαμψία περιστροφής

Οι παρακάτω παράγοντες επηρεάζουν την ακρίβεια της μετάδοσης και για τον λόγο αυτό πρέπει να ληφθούν υπόψη. [Raim09]

- Συμπεριφορά και ακαμψία καλωδίων ιμάντα
 Η μέγιστη επιτρεπόμενη δύναμη έλξεως F_{zul} και η ειδική ακαμψία ελατηρίου C_{Bspez} πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερες.
- Μέγεθος των οδοντωτών τροχαλιών
 Η διάμετρος των τροχαλιών επηρεάζει εις το τετράγωνο την ακαμψία περιστροφής. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της τροχαλίας τόσο καλύτερη είναι η ακαμψία περιστροφής.
- Πλάτος ιμάντα
 Η αύξηση στο πλάτος του ιμάντα βελτιώνει την ακαμψία περιστροφής και την ακρίβεια γωνίας.
- Δύναμη προέντασης
 Η ορθή δύναμη προέντασης είναι πολύ σημαντική για την υψηλής ακρίβειας μεταφορά κίνησης.

5.3.3 Μέγιστος ρυθμός περιστροφής και απαιτούμενη ροπή επιτάχυνσης

Η ροπή αδραειάς των περιστρεφόμενων τμημάτων είναι σύμφωνα με το Solidworks

$$: J = 0,009024 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

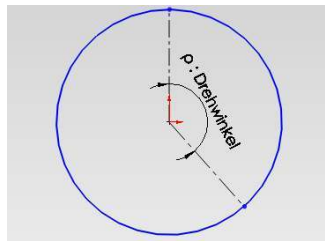
Καθορισμός της επιθυμητής επιτάχυνσης :

π.χ. γωνία περιστροφής $\rho = 180^\circ$, χρόνος επιτάχυνσης $t_b = 0,5 \text{ sec}$,

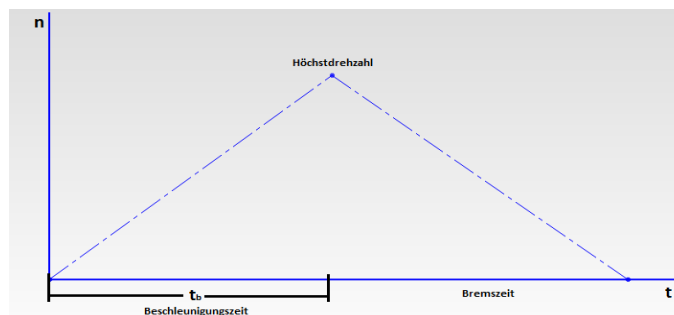
$$\text{γωνιακή επιτάχυνση } a = \frac{2\pi \cdot \rho}{180 \cdot t_b^2} = \frac{2\pi \cdot 180}{180 \cdot 0,5^2} = 25,13 \frac{\text{rad}}{\text{sec}^2}$$

$$\text{Μέγιστος ρυθμός περιστροφής } n_2 = \frac{a \cdot t_b \cdot 60}{2\pi} = \frac{25,13 \cdot 0,5 \cdot 60}{2\pi} = 120 \text{ Urpm}$$

$$\text{Ροπή επιτάχυνσης } M_b = \frac{\Delta n \cdot J}{9,55 \cdot t_b} = \frac{120 \cdot 0,009024}{9,55 \cdot 0,5} = 0,227 \text{ N} \cdot \text{m}$$



Εικόνα 31, επιθυμητή γωνία περιστροφής



Εικόνα 32, επιθυμητός χρόνος επιτάχυνσης

5.3.4 Καθορισμός αριθμού δοντιών σύμφωνα με τον κατάλογο της Continental

Επιλεγμένη σχέση μετάδοσης $i = 2$. (Η διάμετρος των τροχαλιών πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη)

Αριθμός δοντιών μικρής τροχαλίας $z_1 = 30$, αριθμός εμπλεκόμενων δοντιών $z_{e1} = 13$

Αρ. δοντιών μεγάλης τροχαλίας $z_2 = 60$, αριθμός εμπλεκόμενων δοντιών $z_{e2} = 16$

$$\text{Ενεργή διάμετρος } d_{w1} = \frac{p \cdot z_1}{\pi} = \frac{5 \cdot 30}{\pi} = 47,75 \text{ mm}, \quad d_{w2} = \frac{p \cdot z_2}{\pi} = \frac{5 \cdot 60}{\pi} = 95,49 \text{ mm}$$

5.3.5 Υπολογισμός πλάτος ιμάντα

Ροπή μικρής τροχαλίας $M_1 = M_b / i = 0,227 / 2 = 0,114 N \cdot m$

→ $0,96 N \cdot m$ (Oriental Motor Katalog)

$$b = \frac{100 \cdot M_1}{z_1 \cdot z_{e1} \cdot M_{spec}} = \frac{100 \cdot 1,30}{30 \cdot 13 \cdot 3,08} = 0,108 cm = 1,08 mm$$

Στον κατάλογο της Continental διατίθενται πλάτη ιμάντα από 6 χιλ. Για την βελτίωση της συμπεριφοράς σε επιμήκυνση επιλέγεται πλάτος ιμάντα 10 χιλιοστών.

Το πλάτος αυτό μπορεί να υποστηρίξει κινητήρα με μέγιστη ροπή :

$$M = \frac{b \cdot z_1 \cdot z_{e1} \cdot M_{spez}}{1000} = \frac{10 \cdot 30 \cdot 13 \cdot 3,08}{1000} = 12 N \cdot m$$

Η τιμή M_{spez} παρέχεται από τον κατασκευαστή (δείτε παρακάτω πίνακα). Ο ρυθμός περιστροφής της μικρής τροχαλίας υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$n_1 = i \cdot n_2 = 2 \cdot 120 = 240 Upr \rightarrow 300 Upr$$

R.p.m. n [min ⁻¹]	F _{Uspec} [N/cm]	M _{spec} [Nm/cm]	P _{spec} [W/cm]
0	44,13	3,51	0,00
20	43,63	3,48	0,07
40	43,13	3,44	0,14
60	42,63	3,40	0,21
80	42,25	3,36	0,28
100	41,88	3,33	0,35
200	40,00	3,19	0,67
300	38,63	3,08	0,96

Εικόνα 33, Καθορισμός των σταθερών Mspez και Fspez [Cont12]

5.3.6 Υπολογισμός μήκος ιμάντα

Απόσταση αξόνων $C = 125..130 mm$

Μήκος ιμάντα

$$L_b = \frac{\pi(d_{w1} + d_{w2})}{2} + 2C + \frac{(d_{w2} - d_{w1})^2}{4C} = \frac{\pi(47,75 + 95,49)}{2} + 2 \cdot 127 + \frac{(95,49 - 47,75)^2}{4 \cdot 127} \Rightarrow$$

$$L_b = 483,49 mm \rightarrow 480 mm$$

AT 5 GEN III		
Type / Length*	Number of teeth	
AT 5 / 450	90	
AT 5 / 455	91	
AT 5 / 480	96	
AT 5 / 490	98	
AT 5 / 500	100	

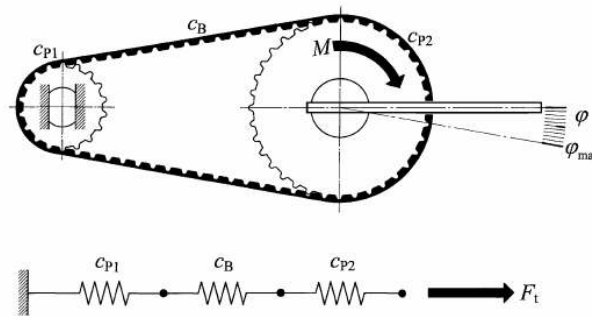
Εικόνα 34, επιλογή μήκος ιμάντα [Cont12]

νέα απόσταση αξόνων

$$C = \frac{1}{4} \left[L_b - \frac{\pi(d_{w1} + d_{w2})}{2} + \sqrt{\left(L_b - \frac{\pi(d_{w1} + d_{w2})}{2} \right)^2 - 2(d_{w2} - d_{w1})^2} \right] = 125,22 \text{ mm}$$

5.3.7 Υπολογισμός ακαμψίας περιστροφής και γωνιακού σφάλματος

Ο υπολογισμός της ακαμψίας περιστροφής (κ) και του γωνιακού σφάλματος (φ) μπορεί να γίνει πιο κατανοητός εάν θεωρήσουμε σαν μοντέλο μια μετάδοση κίνησης μεταξύ δυο αξόνων που βρίσκονται σε σχεδόν ακίνητη κατάσταση (βλέπε παρακάτω σχήμα). Θεωρούμε ότι η μικρή τροχαλία βρίσκεται ακινητοποιημένη ενώ στην μεγάλη τροχαλία εφαρμόζεται ροπή M . Κάτω από αυτές τις συνθήκες και εξαιτίας της ελαστικής συμπεριφοράς του ιμάντα αλλά και λόγω της ελαστικής παραμόρφωσης των δοντιών σχηματίζεται το γωνιακό σφάλμα περιστροφής (φ) [Raim09]



Εικόνα 35, μοντέλο οδοντωτού ιμάντα [Raim09]

Συνολική ακαμψία μεταφοράς $\frac{1}{c_{ges}} = \frac{1}{c_{P1}} + \frac{1}{c_B} + \frac{1}{c_{P2}}$, όπου $c_B = \frac{4 \cdot c_{Bspez}}{L_b}$ και $c_P = c_{Pspez} \cdot z_e$

Η τιμή c_{Bspez} υπολογίζεται από την εξίσωση $c_{Bspez} = \frac{F_{zul}}{\Delta l_{(1m)}}$.

Από τον κατάλογο της Continental προκύπτει η μέγιστη επιτρεπόμενη ελκτική δύναμη $F_{zul} = 787 \text{ N}$. Η σταθερά επιμήκυνσης ανέρχεται στα 4mm ανά μέτρο ιμάντα.

$$\text{Άρα } c_{Bspez} = \frac{F_{zul}}{\Delta l_{(1m)}} = \frac{787}{0,004} = 196750 \text{ N}$$

Tension member strength (permitted tensile force of the belt F_{zul}), Belt weight										
Belt width	b	[mm]	6	10	16	25	32	50	75	100
Tension member strength F_{zul}		[N]	417	787	1342	2175	2823	4489	6803	9117
Belt weight	AT 5 GEN III	[kg/m]	0,022	0,036	0,058	0,090	0,115	0,180	0,270	0,360

Εικόνα 36, καθορισμός της επιτρεπόμενης ελκτικής δύναμης [Cont12]

Ειδική ακαμψία ανά εμπλεκόμενο δόντι σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα [Raim09]:

$$c_{P_{spez}} = \frac{10}{16} 144000 \Rightarrow c_{P_{spez}} = 90000 \frac{N}{m}$$

			Riemenbreite in mm					
			16	25	32	50	75	100
AT5	F_{ml}	N	1.300	2.000	2.800	4.200		
	$c_{B_{spez}}$	$10^3 N$	330	500	650	1.050		
Normal-Lücke	$c_{P_{spez}}$	$10^3 N/m$	144	225	288	450		
se-Lücke	$c_{P_{spez}}$	$10^3 N/m$	192	300	384	600		
0-Lücke	$c_{P_{spez}}$	$10^3 N/m$	240	375	480	750		
		$\times 0.625$						

Εικόνα 37, καθορισμός της ειδικής ακαμψίας [Raim09]

$$\text{Ακαμψία καλωδίων ιμάντα } c_B = \frac{4 \cdot c_{B_{spez}}}{L_b} = \frac{4 \cdot 196750}{0,480} = 1639583 \frac{N}{m}$$

$$\text{Ακαμψία δοντιών } c_{P1} = c_{P_{spez}} \cdot z_e = 90000 \cdot 13 = 1170000 \frac{N}{m},$$

$$c_{P2} = c_{P_{spez}} \cdot z_e = 90000 \cdot 16 = 1440000 \frac{N}{m}$$

$$\text{Συνολική ακαμψία μεταφοράς } \frac{1}{c_{ges}} = \frac{1}{c_{P1}} + \frac{1}{c_B} + \frac{1}{c_{P2}} \Rightarrow c_{ges} = 463165 \frac{N}{m}$$

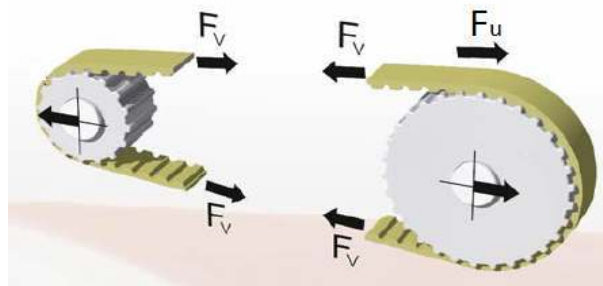
$$\text{Ακαμψίας περιστροφής } k = \frac{d_{w2}^2 \cdot c_{ges}}{4} = \frac{0,09549^2 \cdot 463165}{4} = 1055,89 \frac{N \cdot m}{rad}$$

$$\text{Γωνιακό σφάλμα } \varphi = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{M_1 \cdot i}{k} = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{1,30 \cdot 2}{1055,89} = 0,141^\circ$$

5.3.8 Υπολογισμός δύναμης προέντασης (Fv)

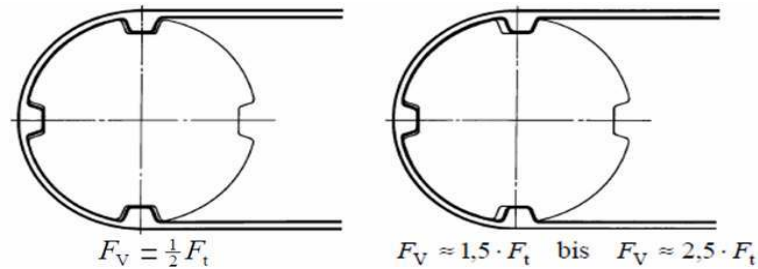
$$\text{Περιφερειακή δύναμη } F_u = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot M_1 \cdot i}{d_{w2}} = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot 1,3 \cdot 2}{95,49} = 54,46 N$$

$$\text{Προένταση ανά ιμάντα } F_v \geq \frac{1}{2} \cdot F_u = \frac{1}{2} \cdot 54,46 = 27,23 N \rightarrow 28 N$$



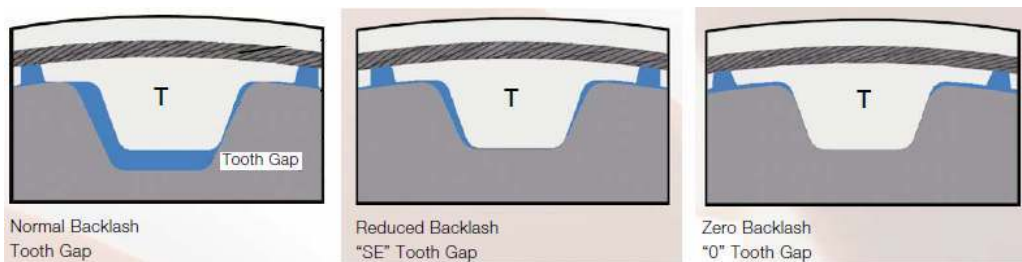
Εικόνα 38, δυνάμεις ιμάντα [Cont12]

Για μια ιδανική μετάδοση κίνησης, με όσο το δυνατόν μικρότερο σφάλμα μεταφοράς, συνιστάται η αύξηση της δύναμης προέντασης στα επίπεδα του $1,5 \dots 2,5 \cdot F_u$ [Raim09]. Η αύξηση αυτή προκαλεί παραμόρφωση των δοντιών (δείτε παρακάτω σχέδιο) με αποτέλεσμα την εξάλειψη των κενών ανάμεσα στα δόντια του ιμάντα και των αντίστοιχων δοντιών της τροχαλίας. Σε αυτή την περίπτωση, η μετάδοση της κίνησης μπορεί να θεωρηθεί ότι γίνεται χωρίς καθόλου «παίξιμο».



Εικόνα 39, μετάδοση χωρίς παίξιμο μέσω υπερτάνσης [Raim09]

Επίσης συνιστάται η χρήση ιμάντων με μειωμένο ή ακόμη και μηδενικό κενό ανάμεσα στα δόντια (δείτε παρακάτω σχήμα).



Εικόνα 40, συνηθισμένα, μειωμένα και μηδενικά κενά [Cont12]

Εφόσον η επιτρεπόμενη φόρτιση των αξόνων το επιτρέπει, η δύναμη προένταση του ιμάντα μπορεί να είναι : $F_v = 1,5 \dots 2,5 \cdot F_u \approx 81N \dots 136N \rightarrow 100N$

Η δύναμη προένταση ρυθμίζεται μέσω της επιμήκυνσης του ιμάντα. Η απόσταση επιμήκυνσης Δa σε χιλιοστά προκύπτει από την δύναμη προέντασης, το μήκος του ιμάντα καθώς και από την σταθερά ελατηρίου του ιμάντα.

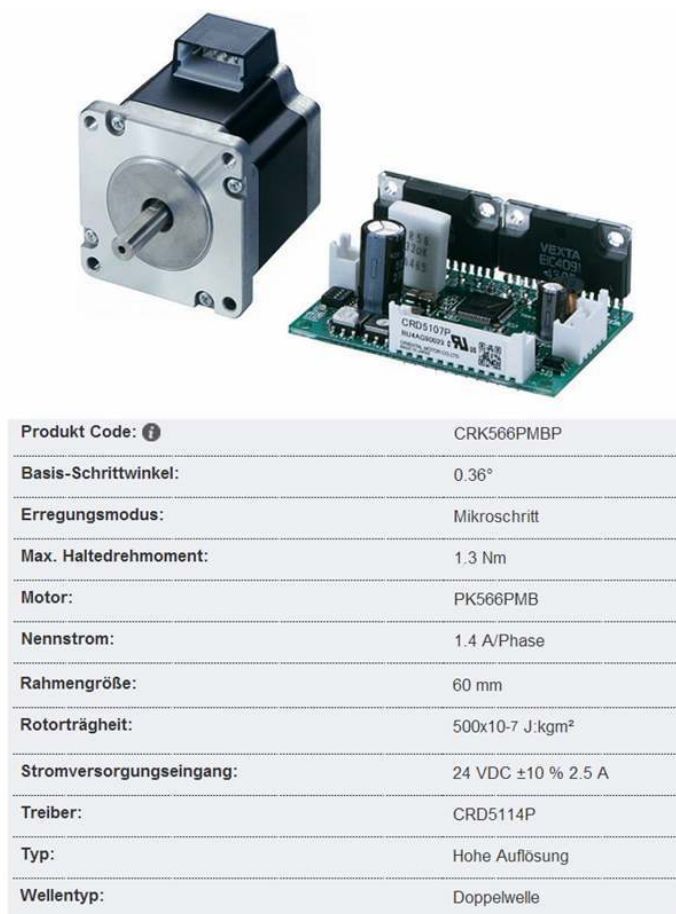
$$\Delta a = \frac{F_v \cdot L_b}{2 \cdot c_{Bspez}} = \frac{100 \cdot 480}{2 \cdot 196750} = 0,12mm$$

5.4 Κινητήρας

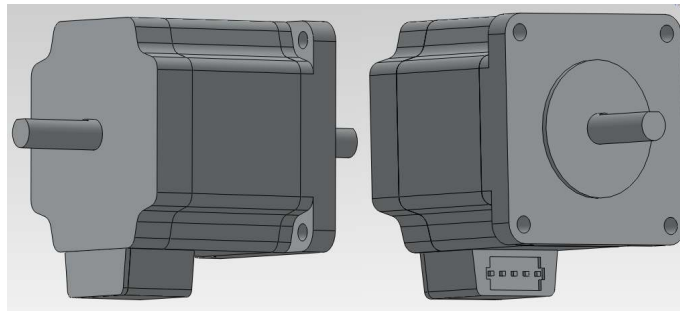
Ο κινητήρας πρέπει να διαθέτει τουλάχιστον τα παρακάτω χαρακτηριστικά

- Μέγιστος ρυθμός περιστροφής : 300 U_{rpm}
- Μέγιστη ροπή : 0,227 N · m
- Υψηλή γωνιακή ανάλυση
- $I_{σχύς} > \frac{M_b \cdot n}{i \cdot 9,55} = \frac{0,227 \cdot 300}{2 \cdot 9,55} = 3,57Watt$

Για μια απλή λειτουργία δίχως συστήματα μέτρησης αποφασίστηκε η επιλογή ενός βηματικού κινητήρα. Στο εργαστήριο υπάρχει ήδη Controller της εταιρείας Orientalmotor και γι' αυτό τον λόγο επιλέχθηκε μοτέρ από τον ίδιο κατασκευαστή. Επιλέχθηκε το μοντέλο CRK566PMBP, διότι μεταξύ άλλων διαθέτει πολύ υψηλή ανάλυση καθώς και υψηλή επιτρεπόμενη φόρτιση άξονα. Ο κινητήρας κόστισε 312 € μαζί με το κύκλωμα οδήγησής του, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οποίου εμφανίζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 41, τεχνικά χαρακτηριστικά CRK566PMBP [Orie14]



Εικόνα 42, 3D-σχέδια του βηματικού κινητήρα

Για να είναι δυνατή η σύνδεση του κινητήρα με τα υπόλοιπα τμήματα της κατασκευής είναι απαραίτητα τα τρισδιάστατα σχέδιά του, τα οποία και απεικονίζονται στην Εικόνα 42.

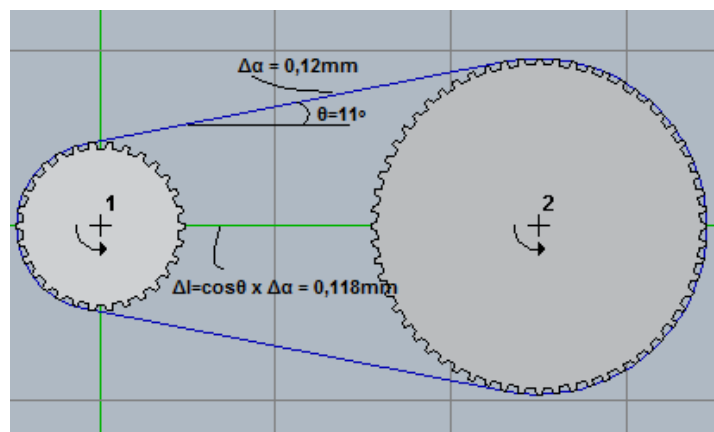
5.5 Προενταήρας

Σύμφωνα με την παράγραφο 5.3.8, για την εφαρμογή μια ορθής δύναμης προέντασης πρέπει ο ιμάντας να επιμηκυνθεί κατά 0,18mm. Λόγο διαφοράς μεγέθους των τροχαλιών πρέπει να υπολογιστεί η απόσταση Δl (δείτε Εικόνα 43)

$$\text{Ισχύει } \cos\theta = \frac{\Delta l}{\Delta\alpha} \Rightarrow \Delta l = \cos\theta \cdot \Delta\alpha = \cos 11^\circ \cdot 0,12 \Rightarrow \Delta l = 0,118\text{mm}$$

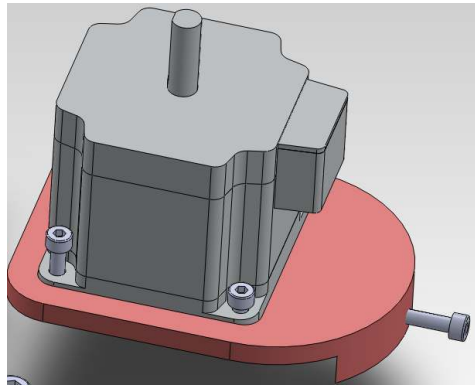
Αυτό σημαίνει ότι η νέα απόσταση των αξόνων γίνεται τώρα :

$$C_{\text{neu}} = 125,22 + 0,118 = 125,338\text{mm} .$$



Εικόνα 43, υπολογισμός επιμήκυνσης ιμάντα

Η απομάκρυνση των αξόνων μπορεί εύκολα να επιτευχθεί, παραδείγματος χάριν με την μετακίνηση του κινητήρα. Για τον λόγο αυτό σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε το παρακάτω εξάρτημα (Εικόνα 44).



Εικόνα 44, μηχανισμός προέντασης

Η απόσταση των αξόνων ρυθμίζεται μέσω ενός κοχλία M4. Το βήμα του κοχλία είναι 0,7 mm και άρα με την περιστροφή κατά $\frac{0,118}{0,7} * 360^\circ = 60^\circ$ του κοχλία επιτυγχάνεται η επιθυμητή απομάκρυνση των αξόνων.

5.6 Δίσκοι λείανσης και κινητήρας

Στο πάνω τμήμα της κατασκευής βρίσκονται δύο δίσκοι λείανσης, ένας με σχετικά χονδρούς αδαμάντινους κόκκους για την αρχική διαμόρφωση και ένας λεπτόκοκκος για την τελική επεξεργασία της επιφάνειας. Το μοντέλο των δίσκων είναι το NBC-ZH204J και παράγονται από την εταιρεία DISCO Corporation (Εικόνα 45).

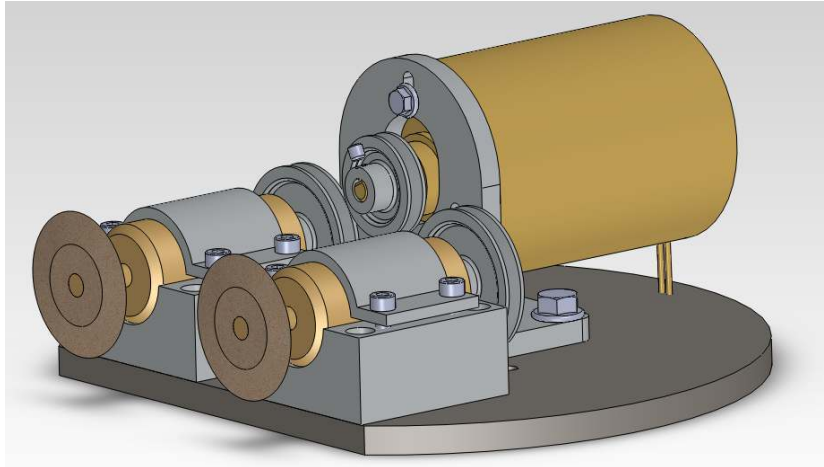


Εικόνα 45, δίσκος λείανσης Disco NBC-ZH204J

Για την κατεργασία των μικροεργαλείων φρεζαρίσματος απαιτείται ένας ρυθμός περιστροφής των δίσκων λείανσης της τάξης των 10.000 rpm. Από την άλλη θα πρέπει κατά την περιστροφή των δίσκων να εξασφαλιστεί ότι το σφάλμα εκκεντρότητας παραμένει κάτω από την τιμή του 1 μm .

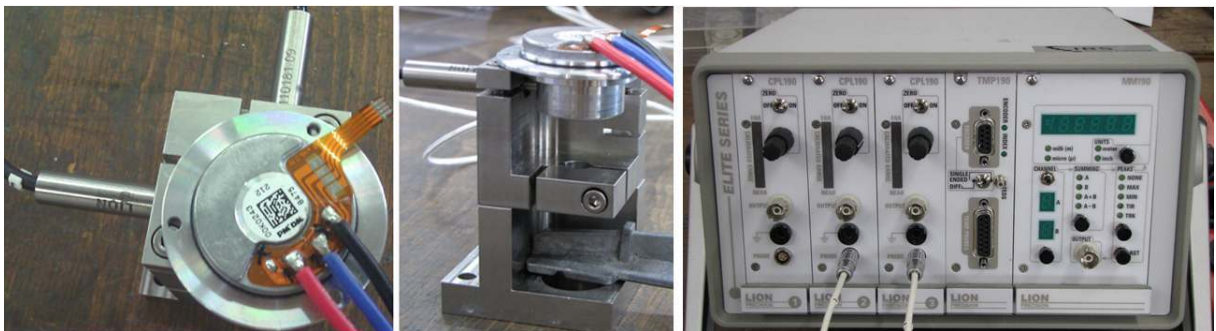
Για τον λόγο αυτό προτάθηκαν και εξετάστηκαν δύο διαφορετικές λύσεις. Η πρώτη ήταν η χρήση δύο ατράκτων με λίπανση αέρος, οι οποίες θα περιστρέφονται μέσω

ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος και μάντα (Εικόνα 46). Η λύση αυτή τελικά απορρίφθηκε διότι από την μια απαιτούσε την πολύπλοκη κατασκευή των ατράκτων με τα ρουλεμάν αέρος και από την άλλη παρουσίαζε υψηλότερο βάρος, σε σχέση με την δεύτερη λύση.

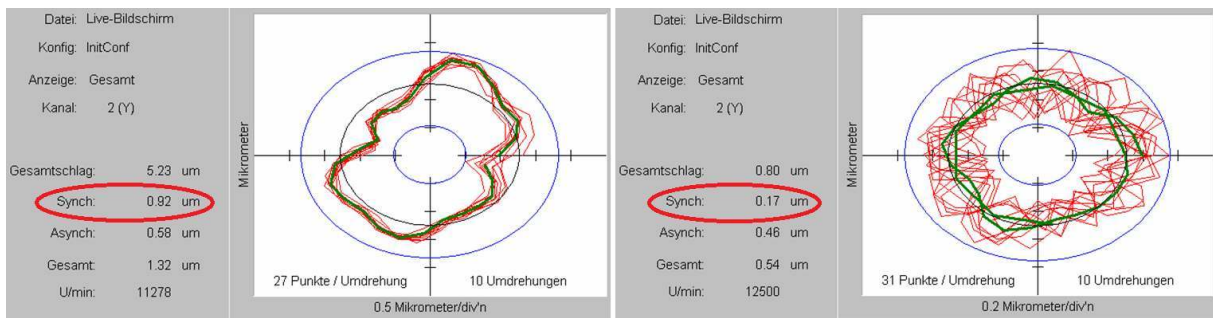


Εικόνα 46, βασική ιδέα της πρώτης λύσης

Η δεύτερη λύση περιλάμβανε την απευθείας σύνδεση των δίσκων λείανσης με κινητήρες συνεχούς ρεύματος δίχως ψήκτρες, οι οποίοι όπως είναι γνωστό διαθέτουν πολύ καλή αναλογία μεταξύ απόδοσης και βάρους. Η εξασφάλιση ενός μικρού σφάλματος εκκεντρότητας επιτυγχάνεται με την χρήση κινητήρων από την βιομηχανία σκληρών δίσκων Hitachi. Οι κινητήρες αυτοί πετυχαίνουν μέγιστο ρυθμό περιστροφής περίπου 11250 rpm στα 12 V. Το σφάλμα εκκεντρότητας μετρήθηκε και βρέθηκε να είναι μικρότερο από 1 μ m όταν ο κινητήρας λειτουργεί σε οριζόντιο προσανατολισμό (Εικόνα 48 αριστερά), ενώ κυμαίνεται περίπου στα 0,2 μ m σε κάθετο προσανατολισμό του άξονα του κινητήρα (Εικόνα 48 δεξιά). Στην εικόνα Εικόνα 47 απεικονίζεται η συσκευή μέτρησης εκκεντρότητας ενώ το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το Spindle Error Analyzer Version 8 της εταιρείας Lion Precision.

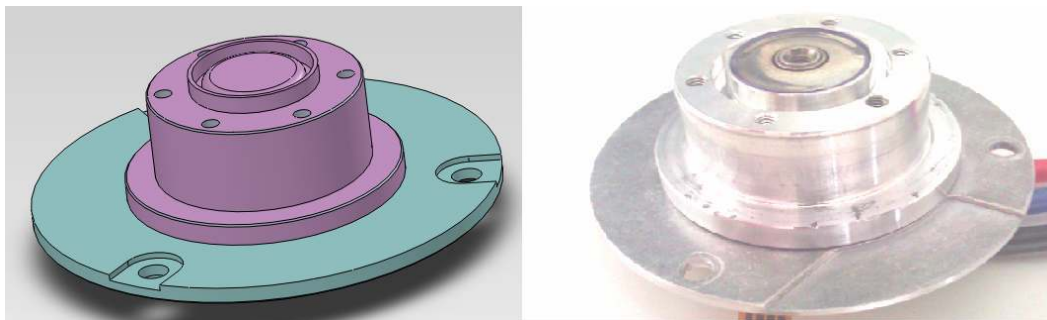


Εικόνα 47, συσκευή μέτρησης εκκεντρότητας



Εικόνα 48, αποτελέσματα του Spindle Error Analyzer

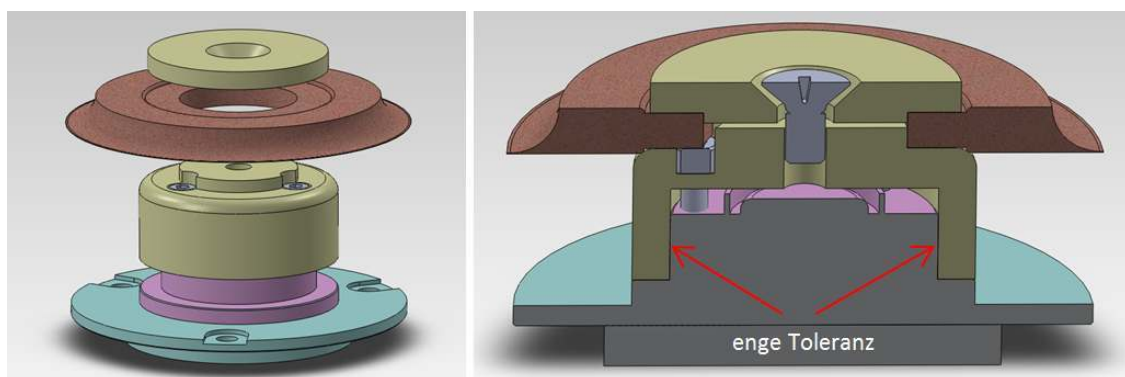
Το τρισδιάστατο μοντέλο του κινητήρα καθώς και φωτογραφία αυτό απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα



Εικόνα 49, κινητήρας σκληρού δίσκου

5.7 Συγκράτηση δίσκου λείανσης

Προκειμένου να μπορέσει να μονταριστεί ο δίσκος λείανσης επάνω στον ρότορα του κινητήρα, είναι απαραίτητη η κατασκευή ενός επιπλέον εξαρτήματος. Η συναρμολόγηση των προαναφερόμενων εξαρτημάτων φαίνεται στο παρακάτω σχέδιο.



Εικόνα 50, μοντάρισμα κινητήρα και δίσκου λείανσης

Κατά την διαδικασία κατασκευής του εξαρτήματος συγκράτησης του λειαντικού δίσκου, δόθηκε ιδιαίτερη σημασία σε δύο θέματα. Κατά πρώτων έπρεπε να εξασφαλιστεί μια σφιχτή συναρμογή μεταξύ του εξαρτήματος συγκράτησης και του

ρότορα του κινητήρα και κατά δεύτερον έπρεπε το νέο εξάρτημα να είναι εντελώς ζυγισταθμισμένο. Οι δύο αυτοί παράγοντες επηρεάζουν μέσω παραγόμενων δονήσεων το σφάλμα εκκεντρότητας των κινητήρων. Για τον λόγο αυτό επιλέχτηκε να γίνει φινίρισμα του εξαρτήματος σε τόρνο υψηλής ακρίβειας (Εικόνα 51, Εικόνα 52).



Εικόνα 51, φινίρισμα του νέου εξαρτήματος



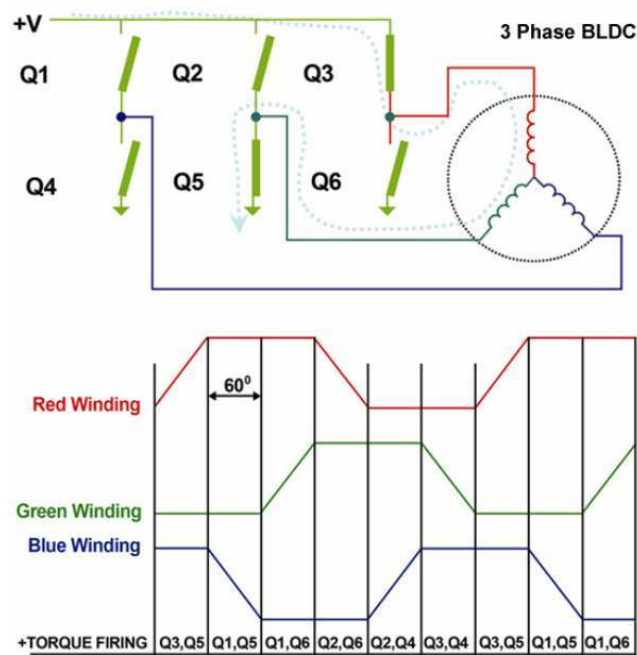
Εικόνα 52, LT-Ultra MTC250, τόρνος υψηλής ακρίβειας

5.8 Έλεγχος ταχύτητας περιστροφής των δίσκων λείανσης

Στην παράγραφο **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** αναφέρθηκε ότι ο κινητήρας των δίσκων λείανσης είναι συνεχούς ρεύματος δίχως ψήκτρες, τριφασικός. Τέτοιου είδους κινητήρες απαιτούνε εναλλασσόμενο ρεύμα συγκεκριμένης μορφής και συχνότητας προκειμένου να μπορέσουν να λειτουργήσουν. Στις επόμενες παραγράφους αναφέρονται τα σημαντικότερα βήματα που χρειάστηκαν ώστε να κατασκευαστεί μια συσκευή ελέγχου ταχύτητας.

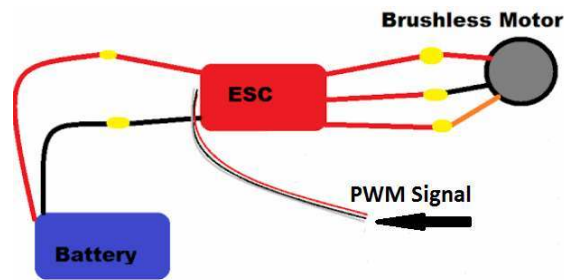
5.8.1 Ηλεκτρονικός ελεγκτής ταχύτητας

Ο ηλεκτρονικός ελεγκτής ταχύτητας (E.S.C.: Electronic Speed Controller) είναι ηλεκτρονικό κύκλωμα το οποίο χρησιμοποιείται για την λειτουργία των τριφασικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος άνευ ψηκτρών. Τροφοδοτεί τον κινητήρα με παλμούς σχετικά χαμηλής τάσης και συγκεκριμένης ακολουθίας. Η σειρά διέγερσης των πηνίων εμφανίζεται στο παρακάτω σχέδιο (Εικόνα 53).



Εικόνα 53, Erregung der Spulen

Ο ηλεκτρονικός ελεγκτής ταχύτητας διαθέτει συνήθως τρεις συνδέσεις, μια για την παροχή ρεύματος, μια για την σύνδεση με τον κινητήρα και μια για την επικοινωνία του με μικροϋπολογιστή (δείτε Εικόνα 54).

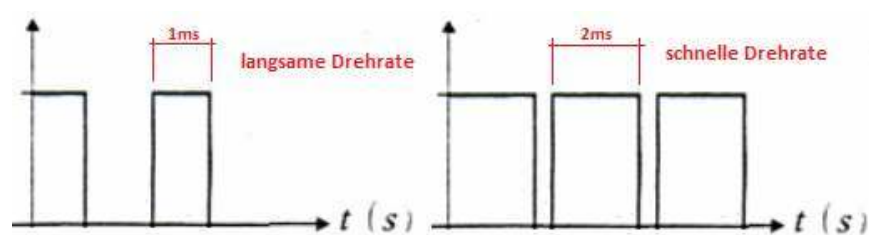


Εικόνα 54, ESC-Συνδεσμολογία

5.8.2 Μικροελεγκτής

Ο μικροελεγκτής είναι ένας μικρός υπολογιστής που βρίσκεται σε ολοκληρωμένο κύκλωμα. Περιέχει έναν επεξεργαστή και όλα τα αναγκαία δομικά συστατικά όπως μνήμη, μετρητές, θύρες εισόδου εξόδου κ.α.

Για να μπορέσει να ελεγχθεί ο ηλεκτρονικός ελεγκτής ταχύτητας (E.S.C.), πρέπει να δοθεί στην είσοδό του διαμορφωμένο σήμα PWM. Οι περισσότεροι μικροελεγκτές διαθέτουν PWM-Module και είναι για τον λόγο αυτό κατάλληλοι για τον έλεγχο των E.S.C. Ο έλεγχος διεξάγεται ως ακολούθως. Ένα PWM σήμα συχνότητας 500 Hz παράγεται από έναν μικροελεγκτή. Το σήμα ελέγχεται μέσω της ρύθμισης του κύκλου λειτουργίας του (Duty Cycle). Σε περίπτωση που επιθυμείται η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής των κινητήρων ρυθμίζεται ο κύκλος λειτουργίας στα 2 ms, ενώ για την ακινητοποίηση του κινητήρα ρυθμίζεται ο κύκλος λειτουργίας στο 1 ms (Εικόνα 55). Οι ενδιάμεσοι χρόνοι προκαλούν ανάλογες αυξομειώσεις στην ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα

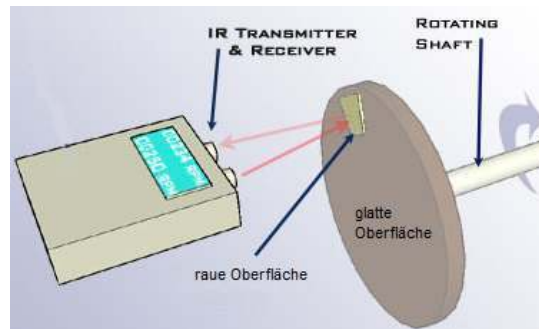


Εικόνα 55, μορφή PWM σήματος για τον έλεγχο του ESC

Για την ρύθμιση του ρυθμού περιστροφής χρησιμοποιήθηκε ποτενσιόμετρο. Η μεταβλητή τάση εξόδου του ποτενσιόμετρου μπορεί να μετρηθεί από κύκλωμα μετατροπής ADC. Ο ελεγκτής PIC16F690 της Microchip διαθέτει μεταξύ άλλων 12 κυκλώματα ADC καθώς και 3 μετρητές, οι οποίοι είναι περισσότερο από αρκετοί για την εφαρμογή μας. Η λειτουργία του μετρητή θα εξηγηθεί στην παράγραφο **Σφάλμα!**
Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..

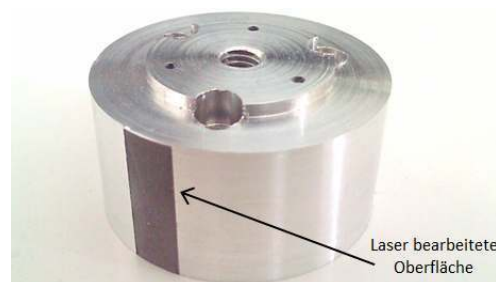
5.8.3 Αισθητήρες υπέρυθρων

Ορισμένα υλικά έχουν την ιδιότητα να αντανακλούν την υπέρυθρη ακτινοβολία και άλλα όχι. Π.χ. γυαλιστερές μεταλλικές επιφάνειες αντανακλούν περισσότερο φως εν συγκρίσει με τις τραχιές επιφάνειες. Επάνω σε αυτή την αρχή βασίζονται οι οπτικοί μετρητές στροφών (Εικόνα 56).



Εικόνα 56, βασική αρχή των οπτικών στροφομέτρων

Ένα υπέρυθρο LED φωτοβολεί επάνω σε περιστρεφόμενο εξάρτημα και συγκεκριμένα στον αντάπτορα μονταρίσματος του δίσκου λείανσης. Η γυαλιστερή κυλινδρική επιφάνεια του εξαρτήματος επεξεργάστηκε αρχικά με ακτινοβολία Laser, έτσι ώστε ένα τμήμα της επιφάνειας αυτής να μην είναι γυαλιστερό και να μην αντανακλά την υπέρυθρη ακτινοβολία (Εικόνα 57). Η αντανάκλαση μετριέται και μετατρέπεται μέσω ηλεκτρονικού κυκλώματος σε ψηφιακό παλμό. Ο μικροελεγκτής μετρά με την βοήθεια των ενσωματωμένων μετρητών του τους παλμούς που δέχεται ανά δευτερόλεπτο και υπολογίζει την ταχύτητα περιστροφής. Το αποτέλεσμα εμφανίζεται στην οθόνη της συσκευής.



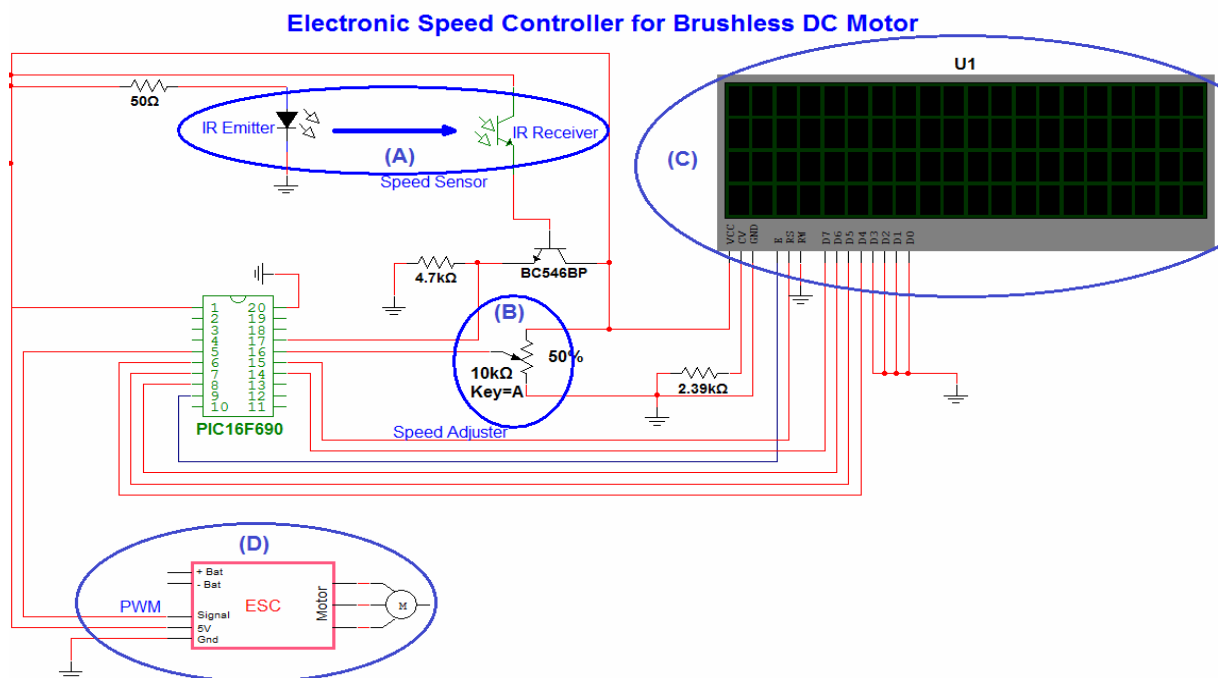
Εικόνα 57, εξάρτημα μετά από επεξεργασία με Laser

5.8.4 Ηλεκτρονικό κύκλωμα

Το ηλεκτρονικό κύκλωμα της συσκευής υποδιαιρείται σε 4 υποκυκλώματα :

- Οι υπέρυθροι αισθητήρας
- Αναλογικό κύκλωμα
- LCD Monitor
- Ηλεκτρονικός Ελεγκτής Ταχύτητας (E.S.C.)

Τα αναφερόμενα υποκυκλώματα όπως και το συνολικό ηλεκτρονικό κύκλωμα της συσκευής εμφανίζεται στην Εικόνα 58. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Multisim 10.1 της εταιρείας „National Instruments“.



Εικόνα 58, ηλεκτρονικό σχέδιο κυκλώματος

5.8.5 Προγραμματισμός

Τόσο η γλώσσα προγραμματισμού MikroC Pro, όσο και το Developing Board Easyric 5 που χρησιμοποιήθηκε προέρχονται από την εταιρεία Mikroelektronika. Ακολουθεί ο κώδικας που αναπτύχθηκε.

```
// LCD module connections
```

```
sbit LCD_RS at RC1_bit;
sbit LCD_EN at RC7_bit;
sbit LCD_D4 at RC4_bit;
sbit LCD_D5 at RC3_bit;
sbit LCD_D6 at RC6_bit;
sbit LCD_D7 at RC2_bit;
```

```
sbit LCD_RS_Direction at TRISC1_bit;
sbit LCD_EN_Direction at TRISC7_bit;
sbit LCD_D4_Direction at TRISC4_bit;
sbit LCD_D5_Direction at TRISC3_bit;
sbit LCD_D6_Direction at TRISC6_bit;
sbit LCD_D7_Direction at TRISC2_bit;
```

```
// End LCD module connections
```

```

int i;
int j;
int DutyC;
short int IntCount=0;
int Pulsecount1=0;
int Pulsecount2=0;
unsigned short PPS1=0;           // PPS : Pulses per second
unsigned short PPS2=0;
unsigned int UPM1=0;           // UPM : Umdrehungen pro Minute
unsigned int UPM2=0;
char txt1[7];
char txt2[7];

void interrupt() {
  // Every second
  if (TMR2IF_bit) {
    TMR2IF_bit=0;           // clear TMR2IF
    IntCount++;
    if (IntCount>30)
      {
        IntCount=0;
        PR2= 0xFA;
        PPS1=Pulsecount1;
        UPM1=PPS1*60;
        PPS2=Pulsecount2;
        UPM2=PPS2*60;
        Pulsecount1=0;
        Pulsecount2=0;
      }
  }

  if (TMR1IF_bit) {
    TMR1IF_bit = 0;           // clear TMR1IF
    TMR1H = 0xFF;
    TMR1L = 0xFF;
    Pulsecount1++;
  }

  if (T0IF_bit) {
    T0IF_bit = 0;           // clear T0IF
    TMR0 = 0b11111111;

    Pulsecount2++;
  }
}

void InitMain() {
  ANSEL = 0b00000001;       // Configure AN pins as digital I/O
  ANSELH = 0;
  C1ON_bit = 0;           // Disable comparators
  C2ON_bit = 0;
  PORTA = 255;
  TRISA = 255;           // configure PORTA pins as input
  PORTB = 0;           // set PORTB to 0
  TRISB = 0;           // designate PORTB pins as output
  PORTC = 0;           // set PORTC to 0
  TRISC = 0;           // designate PORTC pins as output

  // RC0 Analog Input
  TRISC.RC0=1;
  ANS4_bit = 1;

  // 8 Mhz clock speed
  OSCCON.IRCF2 = 1;
  OSCCON.IRCF1 = 1;
  OSCCON.IRCF0 = 1;

  // TMR0
  // TMR0 Clock Source Select bit
  T0CS_bit = 1;           // Transition on RA2 pin
  INTEDG_bit = 0;           // Interrupt on falling edge
  T0SE_bit = 0;           // Increment on low-to-high transition
  PSA_bit = 1;           // Disable Prescaler
  PS2_bit = 0;
  PS1_bit = 0;
  PS0_bit = 0;
  TMR0 = 0b11111111;       // Timer0 initial value
}

```

```

// TMR1
TMR1ON_bit = 1;           // enable Timer1 on RA5 pin
TMR1CS_bit = 1;           // External clock from T1CKI pin
T1OSCEN_bit = 0;         // Disable LP Oscillator

T1CKPS1_bit = 0;         // Disable Prescaler
T1CKPS0_bit = 0;
//T1SYNC_bit = 1;        // Do not synchronize external clock input
TMR1H = 0xFF;           // Timer1 initial value
TMR1L = 0xFF;

//Prescaler to TMR2 & Enable TMR2
T2CON = 0b01111111;

// Enable Interrupts
INTCON.PEIE = 1;
INTCON.GIE = 1;
INTCON.T0IE = 1;         // enable Timer0 interrupt
TMR1IE_bit = 1;         // enable Timer1 interrupt
TMR2IE_bit = 1;         // enable Timer2 interrupt

PWM1_Init(489);         // Initialize PWM1 module at 489Hz

Lcd_Init();             // Initialize LCD

Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);   // Clear display
Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF); // Cursor off
}

void main() {
  initMain();
  Lcd_Out(1,1,"Loading...");
  Delay_ms(2000);
  PWM1_Start();         // start PWM1

  // Initialize ESC Module
  Lcd_Out(1,1,"Initialising");
  Lcd_Out(2,1,"ESC Controller..");
  PWM1_Set_Duty(250);
  Delay_ms(3000);
  PWM1_Set_Duty(120);
  Delay_ms(5000);
  Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);

  DutyC=110;
  PWM1_Set_Duty(DutyC);

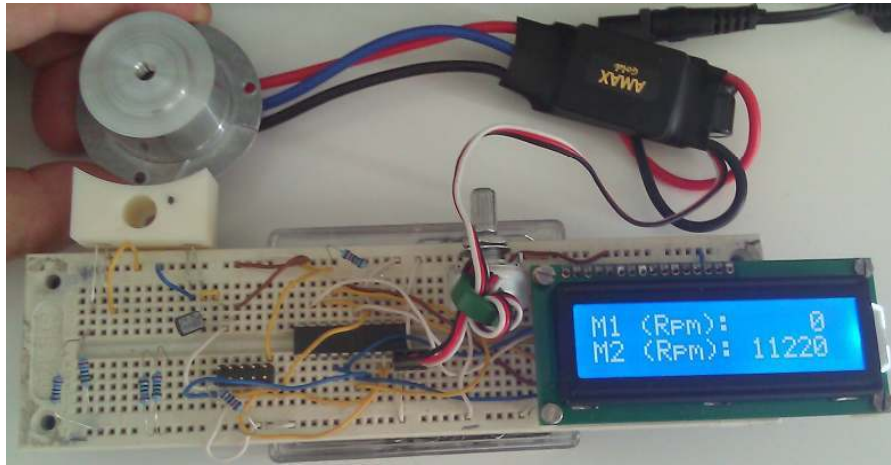
  Lcd_Out(1,1,"M1 (Rpm):");
  Lcd_Out(2,1,"M2 (Rpm):");
  while (1)
  {
    // endless loop
    DutyC = 145./1024. * ADC_Read(4)+110;
    PWM1_Set_Duty(DutyC);
    IntToStr(UPM1, txt1);
    IntToStr(UPM2, txt2);
    Lcd_Out(1,10,txt1);
    Lcd_Out(2,10,txt2);
    Delay_ms(300);
  }
}

```

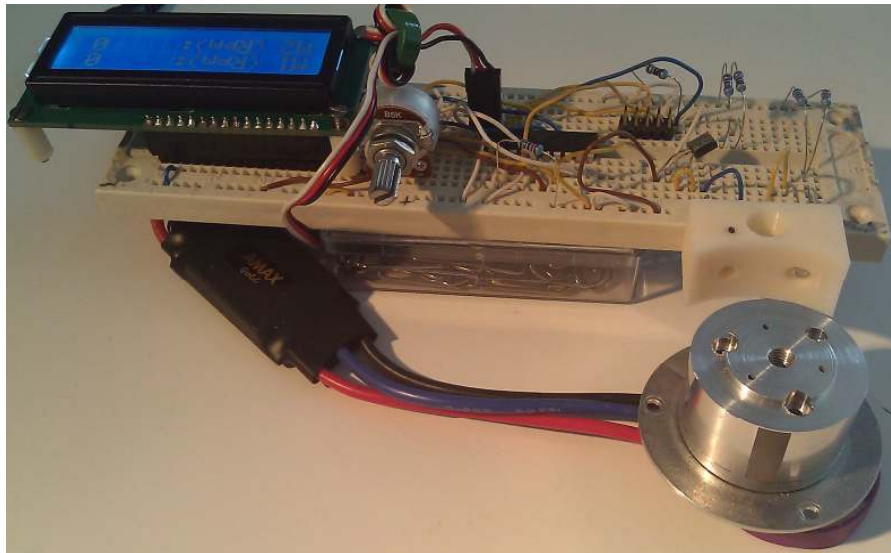
5.8.6 Κατασκευή και δοκιμή του κυκλώματος

Η κατασκευή και δοκιμή του κυκλώματος πραγματοποιήθηκε αρχικά σε πλακέτα δοκιμών Breadboard. Οι πλακέτες αυτές δίνουν την δυνατότητα γρήγορης δημιουργίας ενός πρωτότυπου κυκλώματος και την έπειτα βελτίωσή του μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία. Όταν το κύκλωμα ολοκληρωθεί, ελέγχεται η λειτουργία

του και έπειτα μπορεί να τυπωθεί πάνω σε πλακέτα κυκλώματος (PCB). Στις επόμενες εικόνες βλέπει κανείς τον αρχικό κύκλωμα που κατασκευάστηκε.



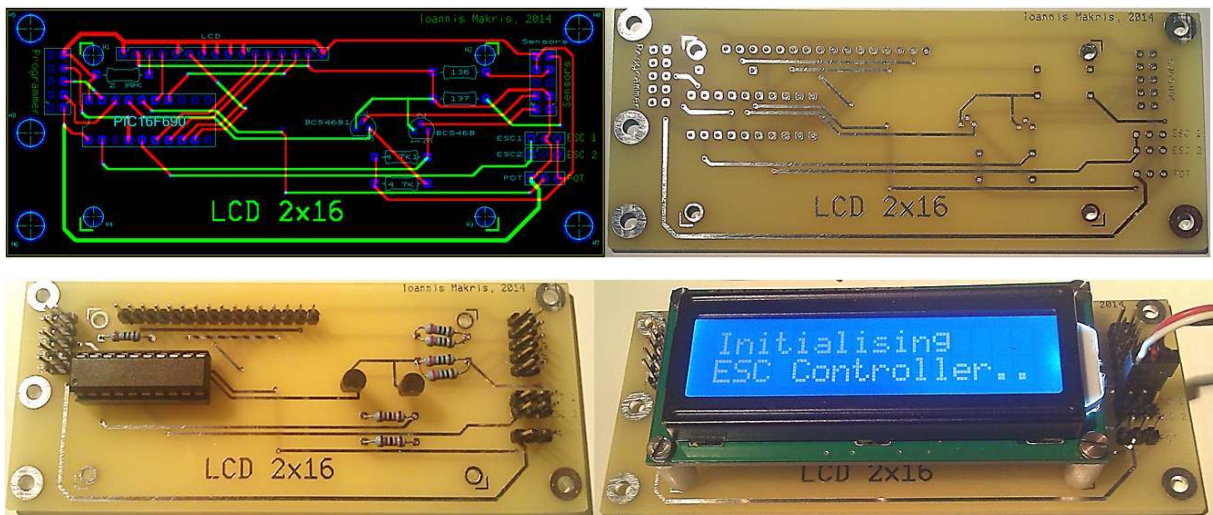
Εικόνα 59, κατασκευή και δοκιμή του κυκλώματος



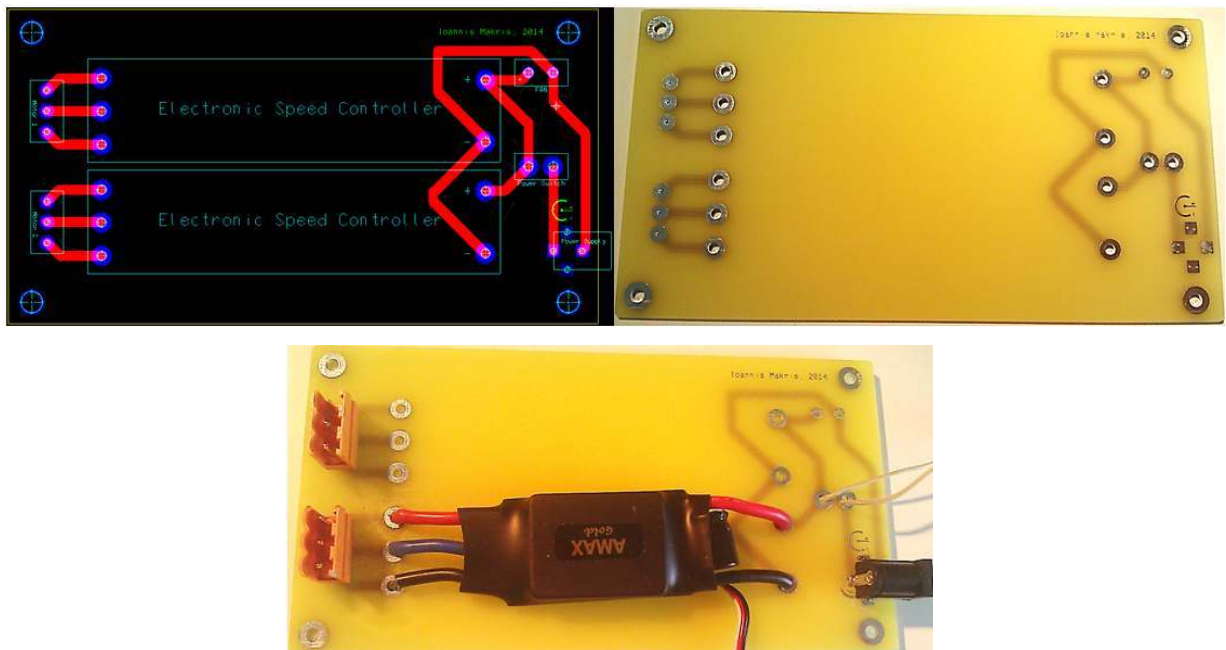
Εικόνα 60, κατασκευή και δοκιμή του κυκλώματος

5.8.7 Πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος

Η πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (στα αγγλικά : Printed Circuit Board) είναι ο φορέας των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων ενός κυκλώματος. Παρέχει την μηχανική υποστήριξη των κομματιών καθώς και τις μεταξύ τους ηλεκτρικές συνδέσεις βάση πάντα ενός ηλεκτρολογικού σχεδίου. Για την καλύτερη κατασκευή της συσκευής σχεδιάστηκαν δύο διαφορετικές πλακέτες. Στις επόμενες εικόνες αποτυπώνονται τα σχέδια των πλακετών, καθώς και εικόνες αυτών μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής τους.



Εικόνα 61, πρώτο κύκλωμα



Εικόνα 62, δεύτερο κύκλωμα

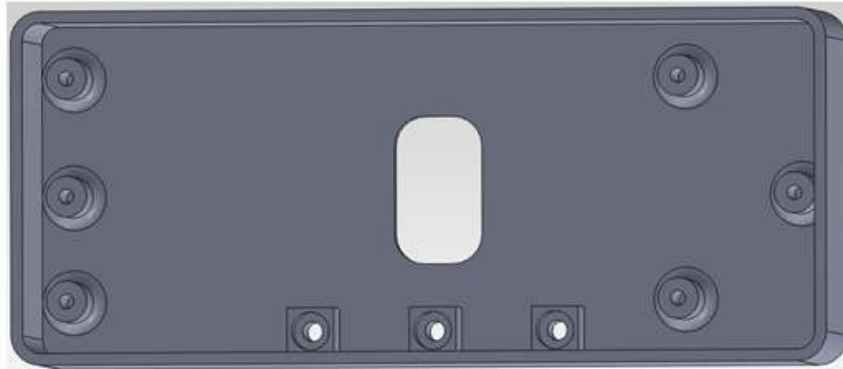
Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των σχεδίων των πλακετών ήτανε το Ultiboard 10.1 της εταιρείας „National Instruments“, ενώ η κατασκευή των πλακετών πραγματοποιήθηκε στο αρμόδιο τμήμα του πανεπιστημίου.

5.8.8 Περίβλημα της συσκευής

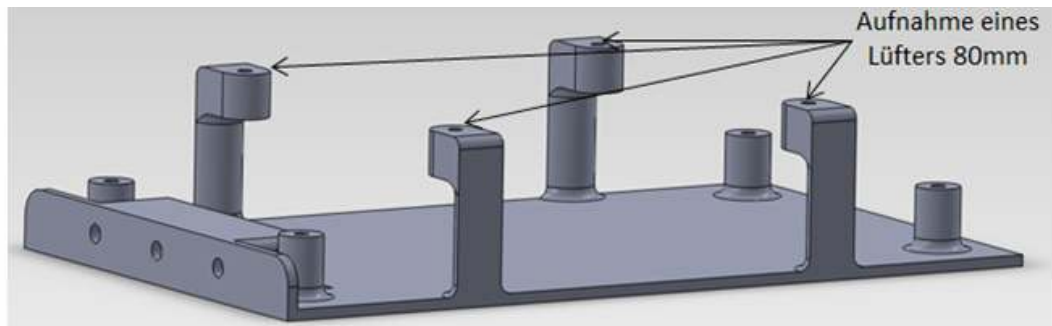
Το περίβλημα της συσκευής διαιρείται σε 3 τεμάχια. Τα δύο πρώτα χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση των πλακετών PCB, των οποίων η στερέωση πραγματοποιείται μέσω λαμαρινόβιδων. Εξαιτίας του γεγονότος ότι η δεύτερη PCB περιλαμβάνει τον ελεγκτή ESC, ο οποίος μπορεί να υπερθερμαίνεται, έχει προβλεφθεί στο 2^ο τεμάχιο

υποδοχή για ανεμιστήρα 80 χιλιοστών. Το τρίτο τεμάχιο χρησιμοποιείται απλά ως κάλυμμα πρόσοψης του πρώτου κομματιού. Διαθέτει επίσης υποδοχές για την LCD οθόνη, τον διακόπτη On/Off καθώς και για το ποτενσιόμετρο ρύθμισης της ταχύτητας. Τα μεμονωμένα τεμάχια καθώς και η συναρμολόγησή τους απεικονίζονται στις επόμενες εικόνες.

Teil 1



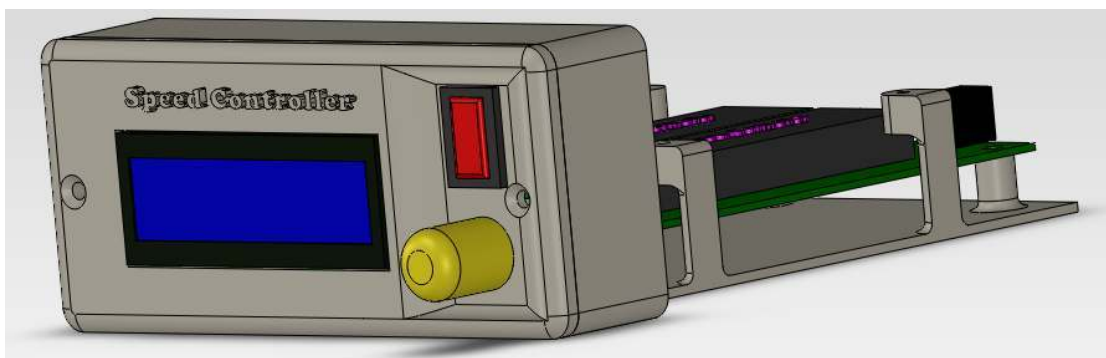
Teil 2



Teil 3



Εικόνα 63, τεμάχια του περιβλήματος



Εικόνα 64, συναρμολόγηση του περιβλήματος

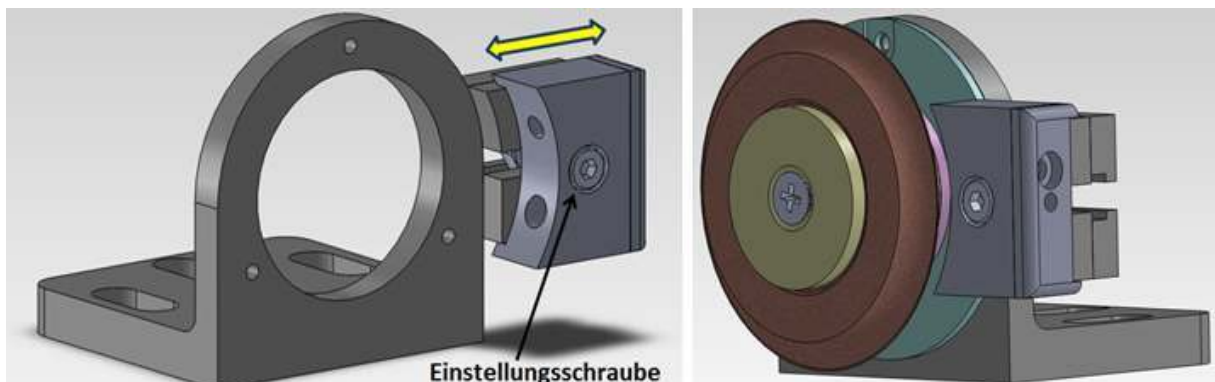
Τα παραπάνω τεμάχια κατασκευάστηκαν από τον τρισδιάστατο εκτυπωτή, ο οποίος υπάρχει διαθέσιμος στο εργαστήριο παραγωγής του πανεπιστημίου. Στις επόμενες εικόνες εμφανίζεται η συσκευή, μετά την ολοκλήρωση της συναρμολόγησής της.



Εικόνα 65, Speed Controller – έτοιμη συσκευή

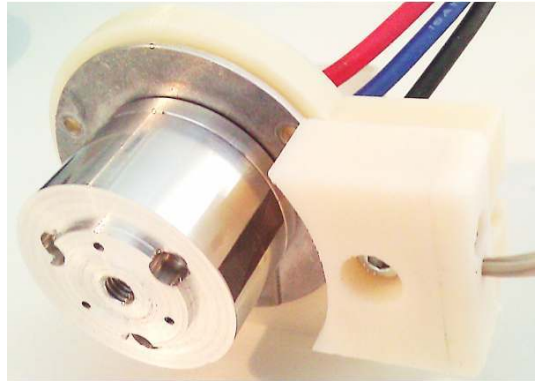
5.9 Συγκράτηση κινητήρων και αισθητήρων

Πρόκειται για το εξάρτημα το οποίο συγκρατεί τόσο τον ηλεκτροκινητήρα του δίσκου λείανσης όσο και τον οπτικό αισθητήρα μέτρησης ρυθμού περιστροφής, ο οποίος πρέπει να βρίσκεται υπό συγκεκριμένη γωνία κλίσης σε σχέση με τον κινητήρα. Για την ακριβή ρύθμιση της απόστασης μεταξύ των αισθητήρων και του περιστρεφόμενου τμήματος του κινητήρα χρησιμοποιήθηκε ένας απλού τύπου οδηγός (Εικόνα 66).



Εικόνα 66, συγκράτηση κινητήρων και αισθητήρων

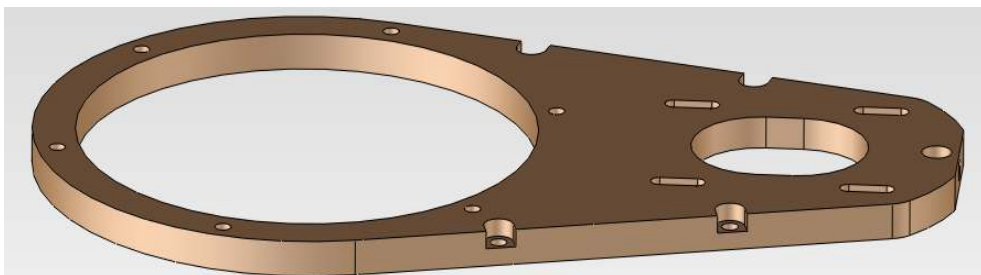
Τα παραπάνω εξαρτήματα τυπώθηκαν στον τρισδιάστατο εκτυπωτή του τμήματος. Ο τρόπος αυτός κατασκευής προσφέρει ένα πολύ ελαφρύ τελικό προϊόν από συνθετικό υλικό σε ιδιαίτερα χαμηλό κόστος. Η επόμενη εικόνα δείχνει τα τεμάχια που κατασκευάστηκαν μονταρισμένα με τον κινητήρα τους.



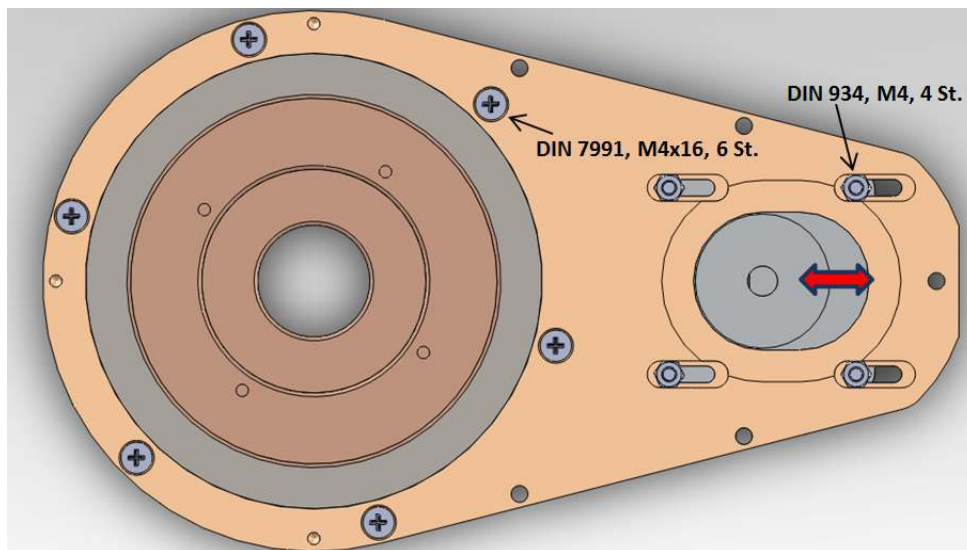
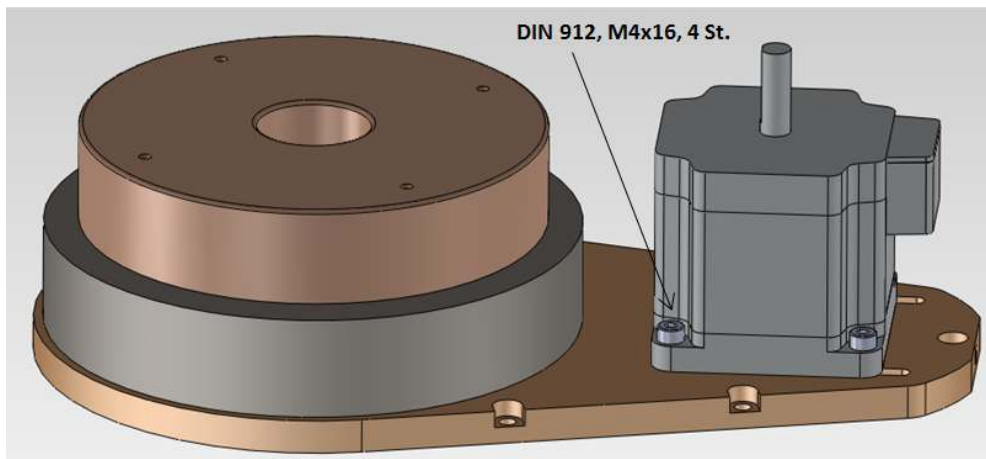
Εικόνα 67, συγκράτηση κινητήρων και αισθητήρων

5.10 Βάση

Η βάση της κατασκευής είναι ένα από τα σημαντικότερα τμήματα της κατασκευής. Επάνω σε αυτή τοποθετούνται το περιστροφικό τραπέζι και ο βηματικός κινητήρας. Υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης της απόστασης μεταξύ των αξόνων τους (τάνυση ιμάντα) μέσω οβάλ οπών. Στις επόμενες εικόνες αποτυπώνονται τα σχέδια του τεμαχίου καθώς και η συναρμολόγησή του με τα υπόλοιπα εξαρτήματα.



Εικόνα 68, Βάση



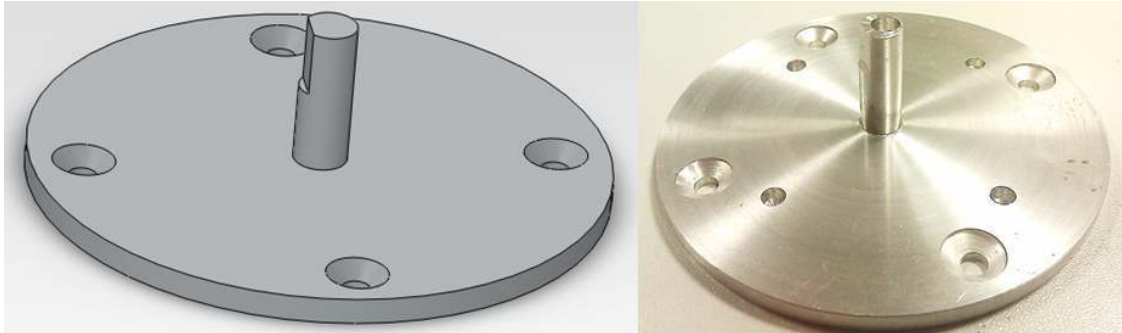
Εικόνα 69, Συναρμολόγηση της βάσης



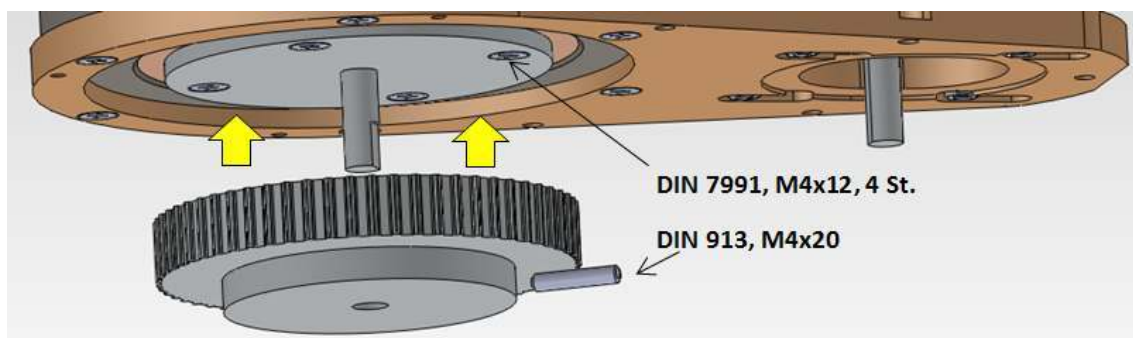
Εικόνα 70, βάση μετά την κατασκευή

5.11 Φλάντζα άξονα

Το εξάρτημα αυτό (Εικόνα 71) συνδέει τον ρότορα του περιστρεφόμενου τραπεζιού με την μεγάλη οδοντωτή τροχαλία. Τέσσερις κοχλίες εγγυώνται την σταθερή σύνδεση της τροχαλίας με την φλάντζα, ενώ ο άξονας της φλάντζας στερεώνεται με την τροχαλία μέσω πείρου με σπείρωμα M4 (Εικόνα 72).



Εικόνα 71, φλάντζα άξονα



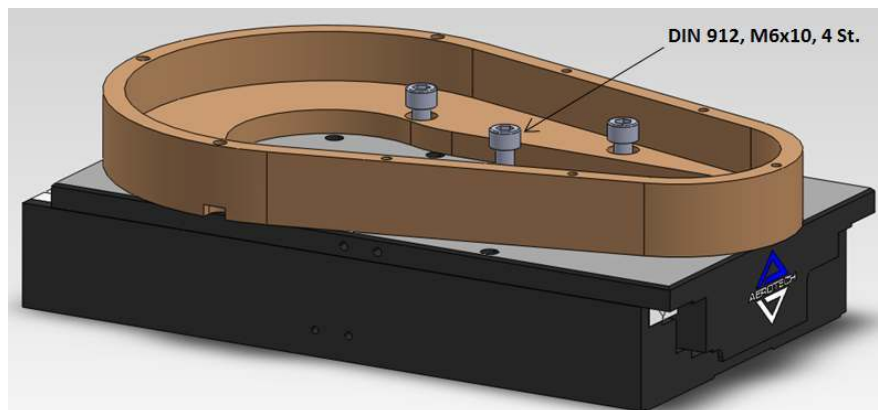
Εικόνα 72, συναρμολόγηση της φλάντζας

5.12 Κάλυμμα ιμάντα

Το τεμάχιο αυτό (Εικόνα 73) εκτός από την κάλυψη του ιμάντα παρέχει και μια σταθερή σύνδεση μεταξύ του γραμμικού τραπεζιού και της βάσης (**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**). Τέσσερις κυλινδρικοί άλεν κοχλίες M6 συνδέουν το κάλυμμα με το τραπέζι (Εικόνα 74), ενώ άλλες οκτώ χρησιμοποιούνται για την σύνδεση με την βάση.



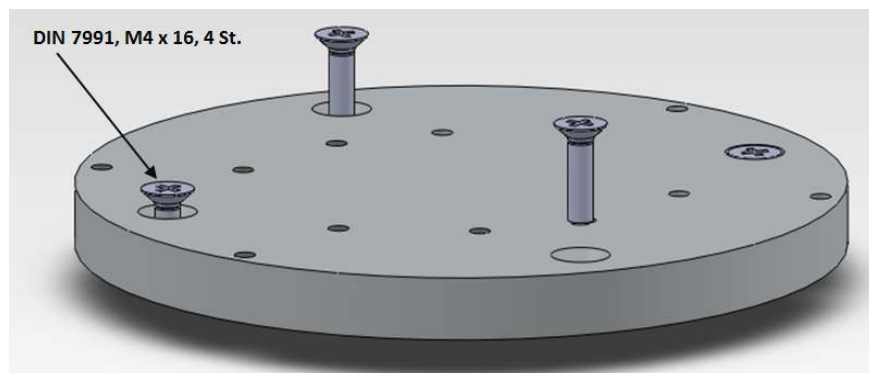
Εικόνα 73, κάλυμμα ιμάντα



Εικόνα 74, συναρμολόγηση του καλύμματος ιμάντα

5.13 Πλάκα μονταρίσματος

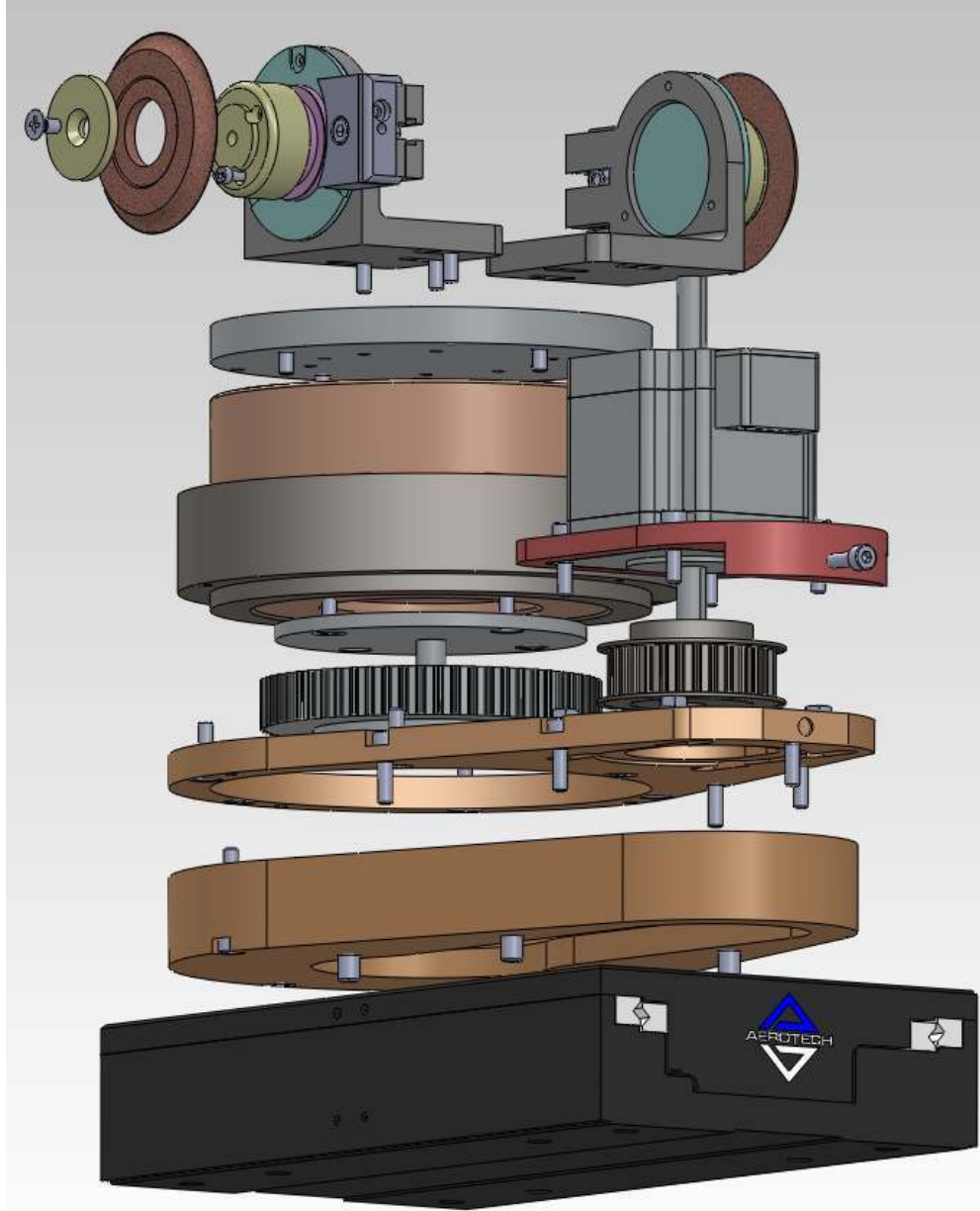
Στο επάνω τμήμα της κατασκευής, ανάμεσα στο περιστροφικό τραπέζι και στους κινητήρες των λειαντικών δίσκων, βρίσκεται η πλάκα μονταρίσματος. Περιέχει διάφορες υποδοχές (Εικόνα 75) σε συγκεκριμένες θέσεις ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτηση και συγκράτηση των βάσεων των ηλεκτροκινητήρων



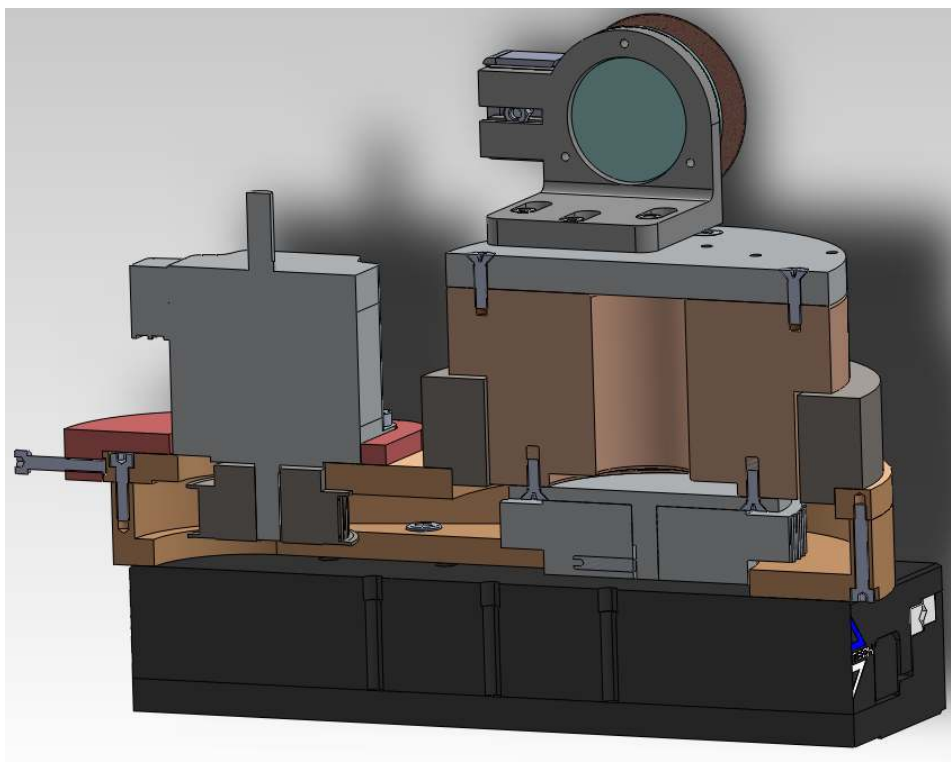
Εικόνα 75, πλάκα μονταρίσματος

5.14 Σχέδια συναρμολόγησης

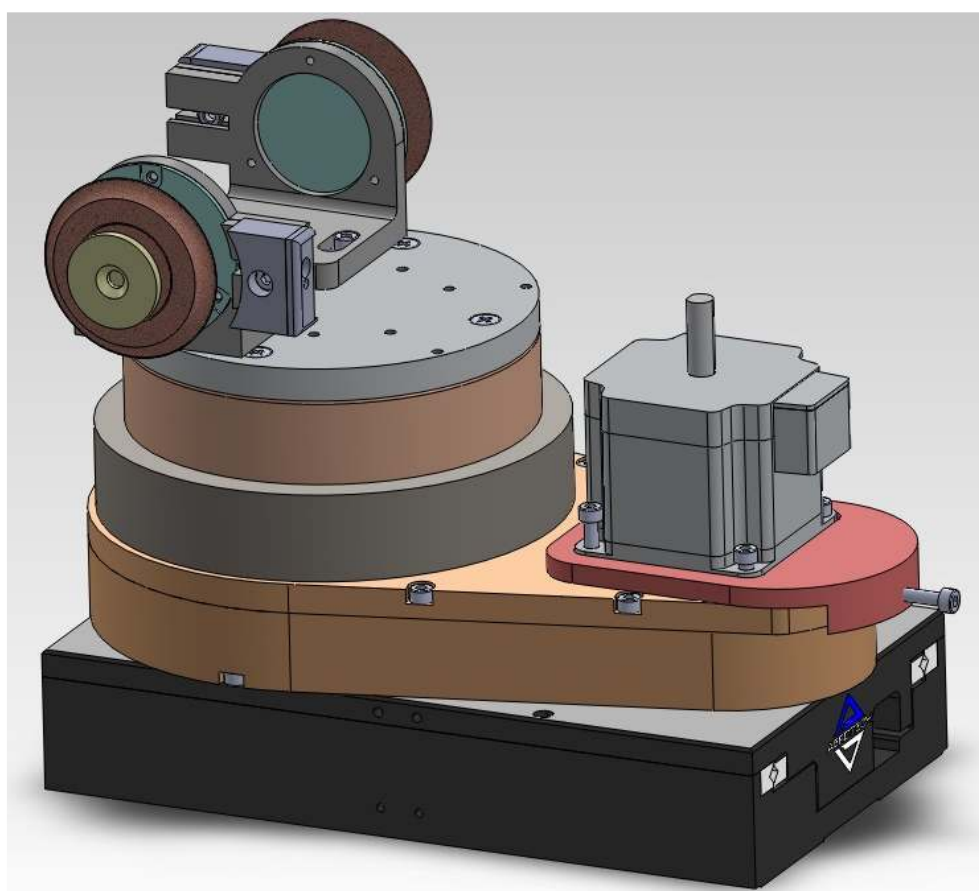
Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζονται τα σχέδια αναλυτικής προβολής, τομή πλάγιας όψης καθώς και συναρμολόγησης.



Εικόνα 76, exploded view



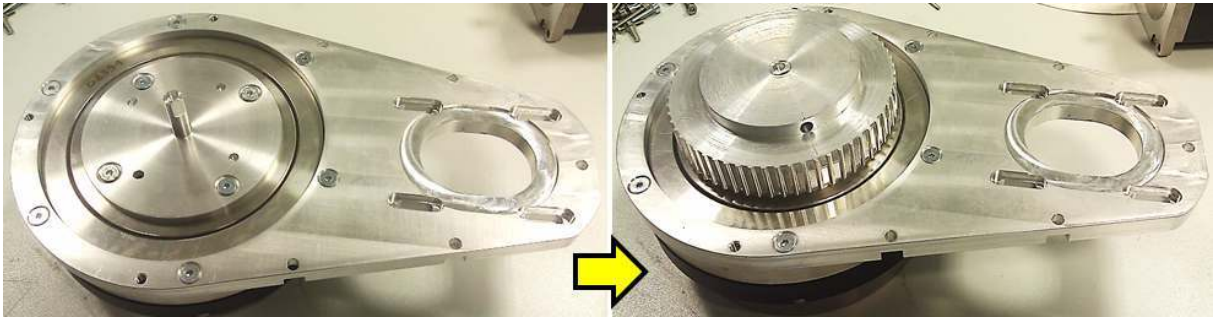
Εικόνα 77, τομή πλάγιας όψης



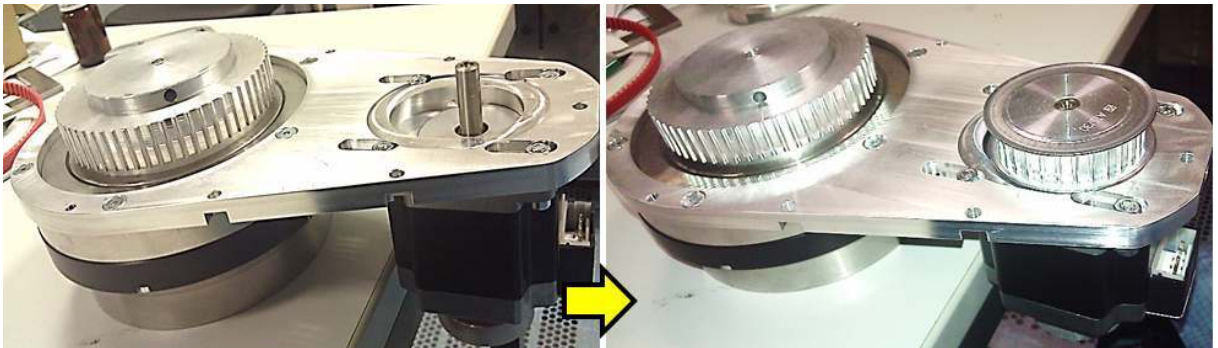
Εικόνα 78, σχέδιο συναρμολόγησης

5.15 Συναρμολόγηση των τεμαχίων

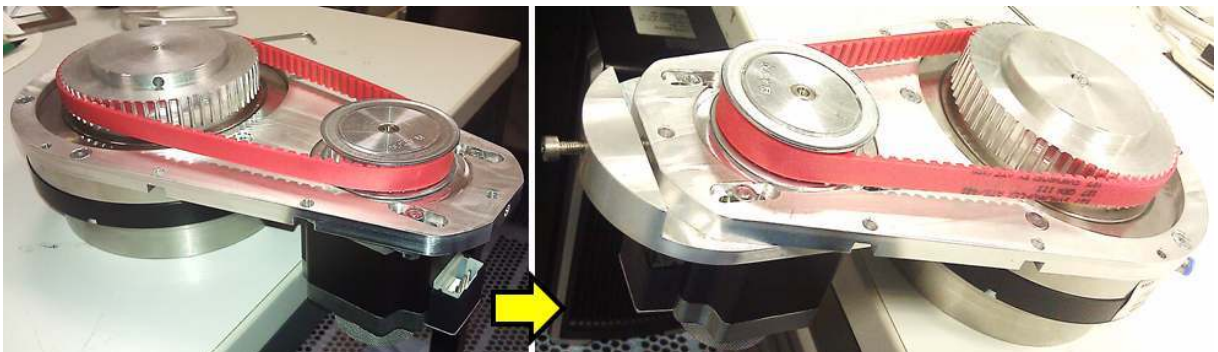
Οι επόμενες εικόνες παρουσιάζουν την σειρά συναρμολόγησης των τεμαχίων που κατασκευάστηκαν.



Εικόνα 79, σειρά συναρμολόγησης των τεμαχίων



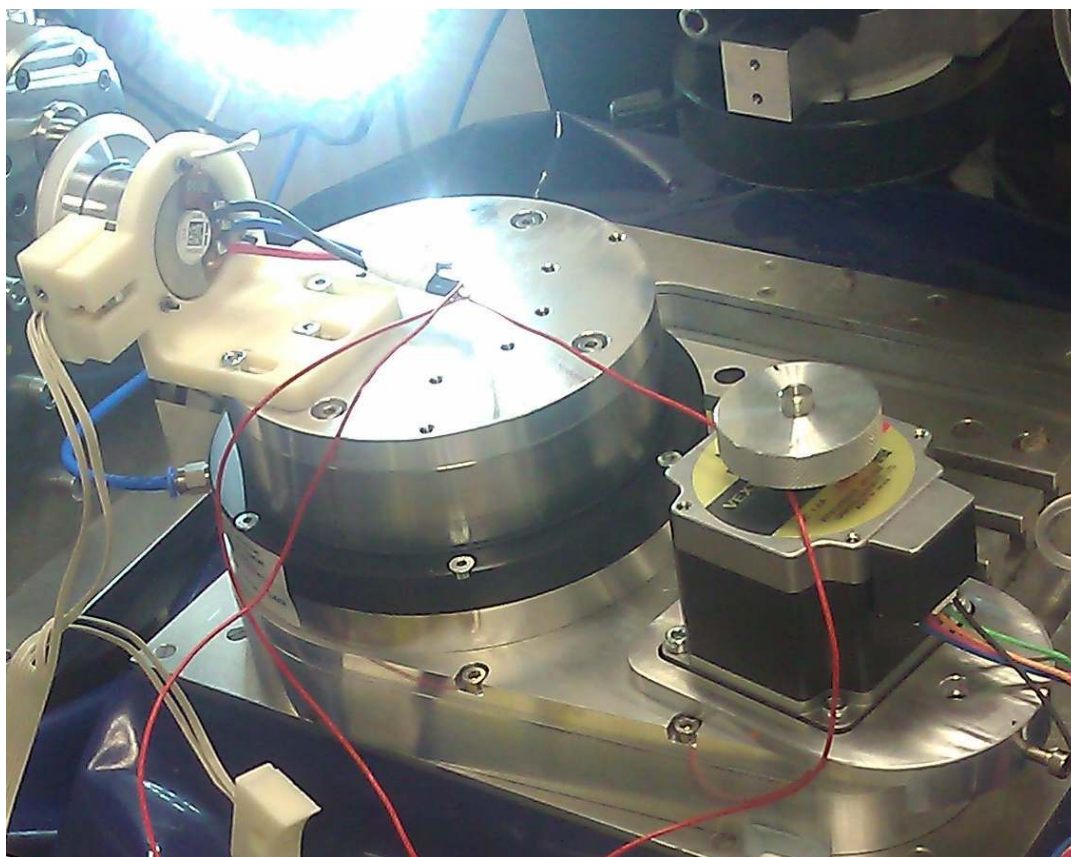
Εικόνα 80, σειρά συναρμολόγησης των τεμαχίων



Εικόνα 81, σειρά συναρμολόγησης των τεμαχίων

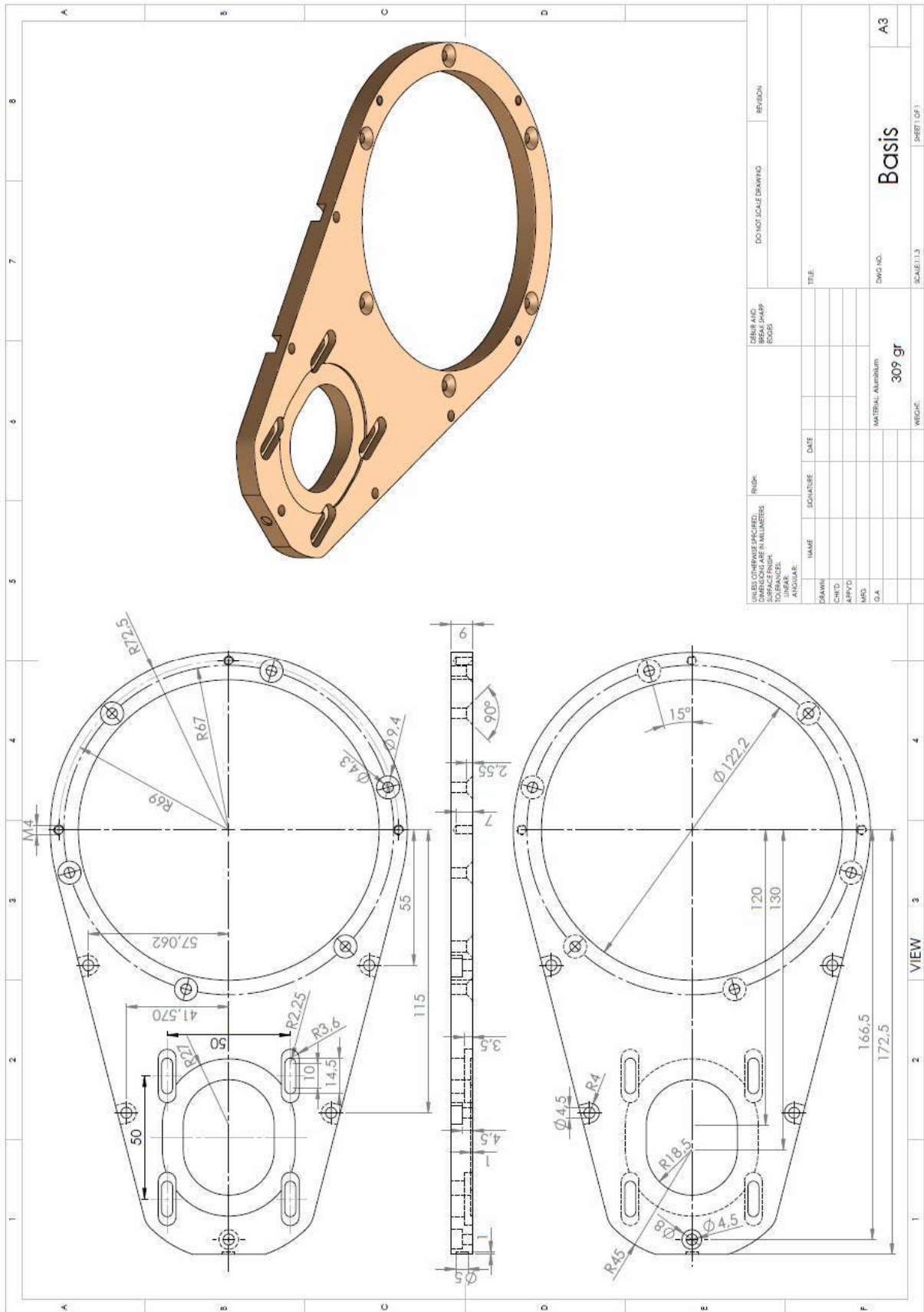


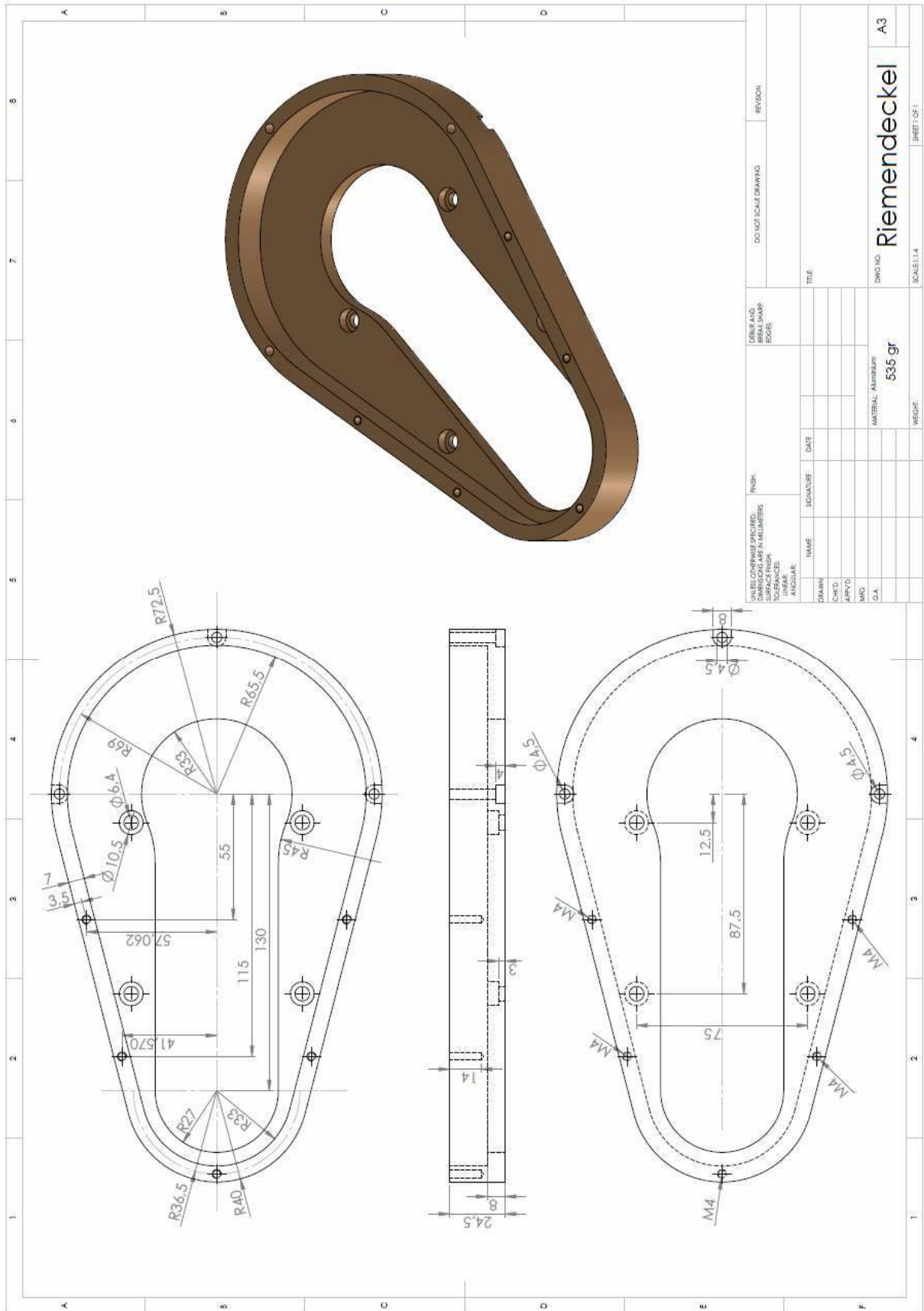
Εικόνα 82, σειρά συναρμολόγησης των τεμαχίων

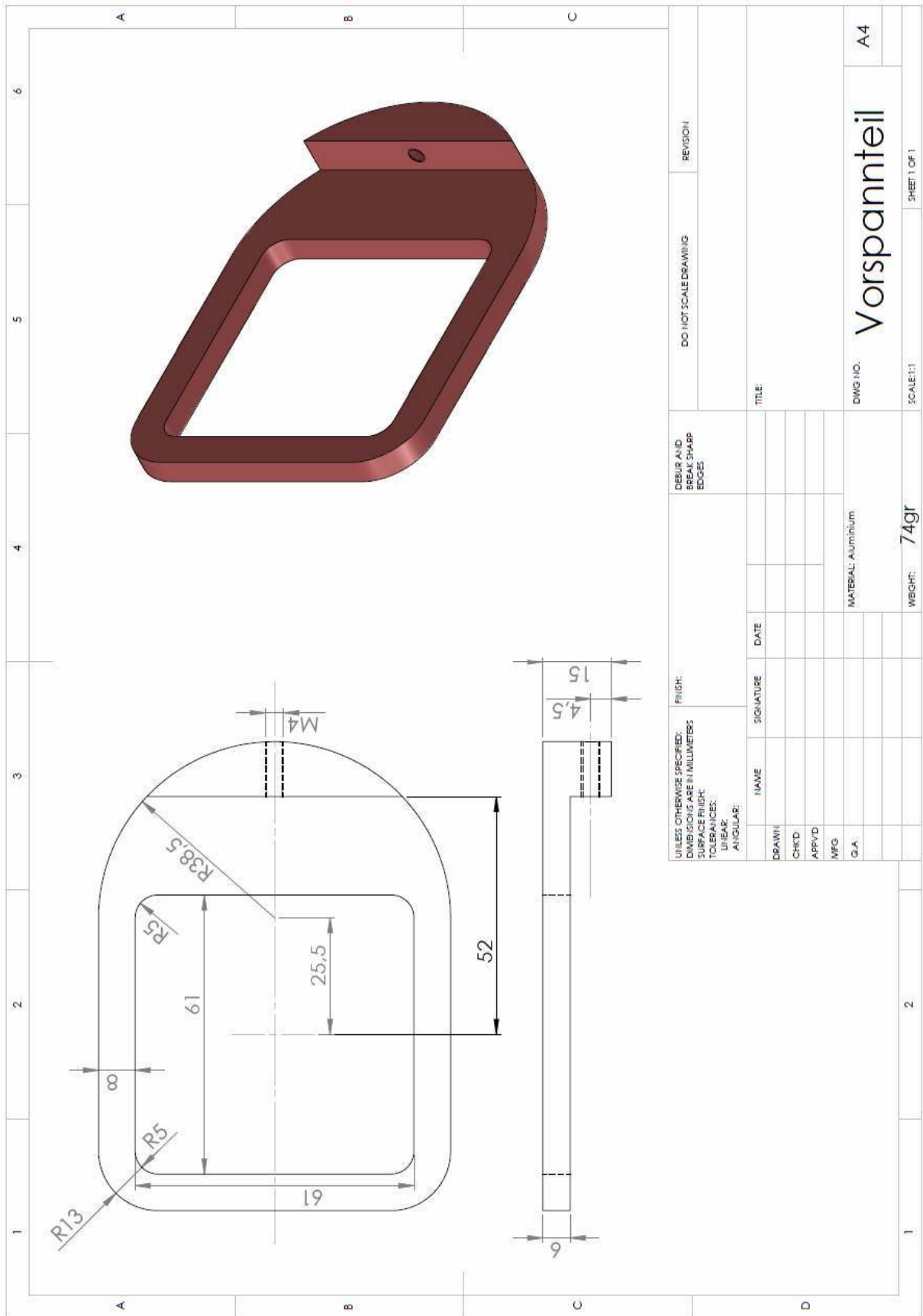


Εικόνα 83, τελική κατασκευή

6 Κατασκευαστικά σχέδια







UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS DIMENSIONS TO SURFACES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND REMOVE SHARP EDGES:		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE					
CHKD									
APPVD									
MFG									
G.A.									
				MATERIAL: ALUMINIUM		DWG NO:		A4	
				WEIGHT: 74gr		SCALE: 1:1		SHEET 1 OF 1	

Vorspannteil

A4

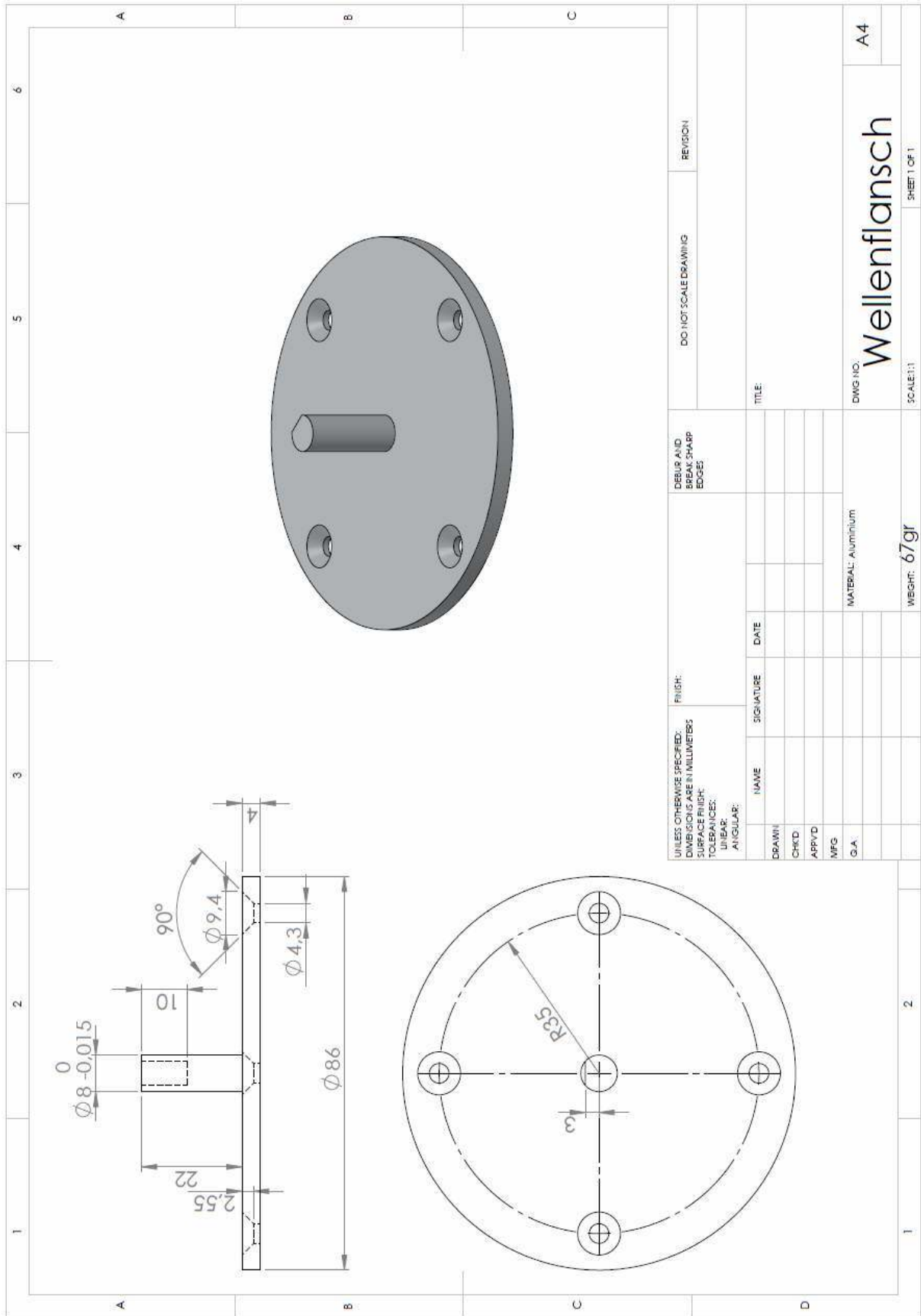
SHEET 1 OF 1

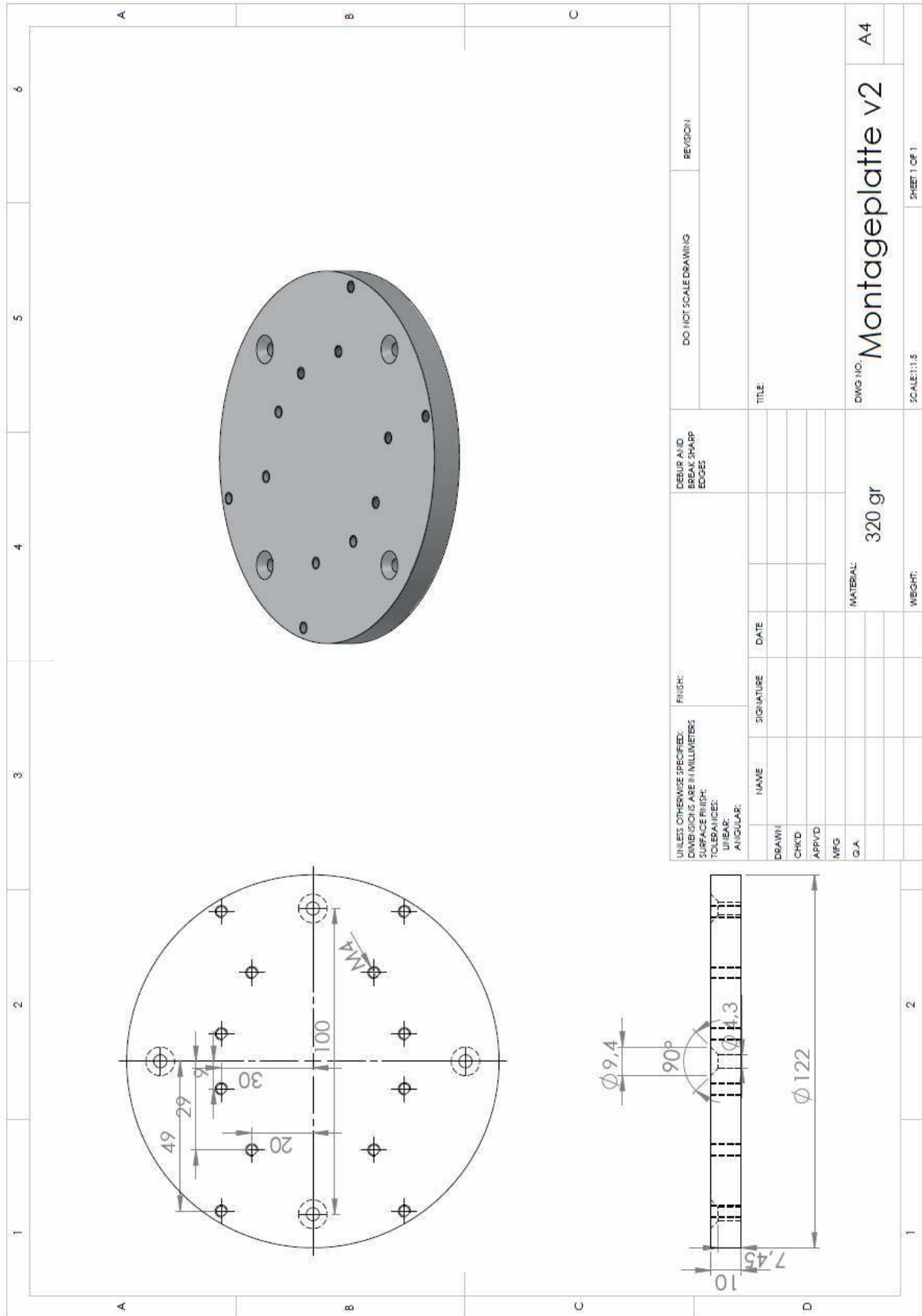
SCALE: 1:1

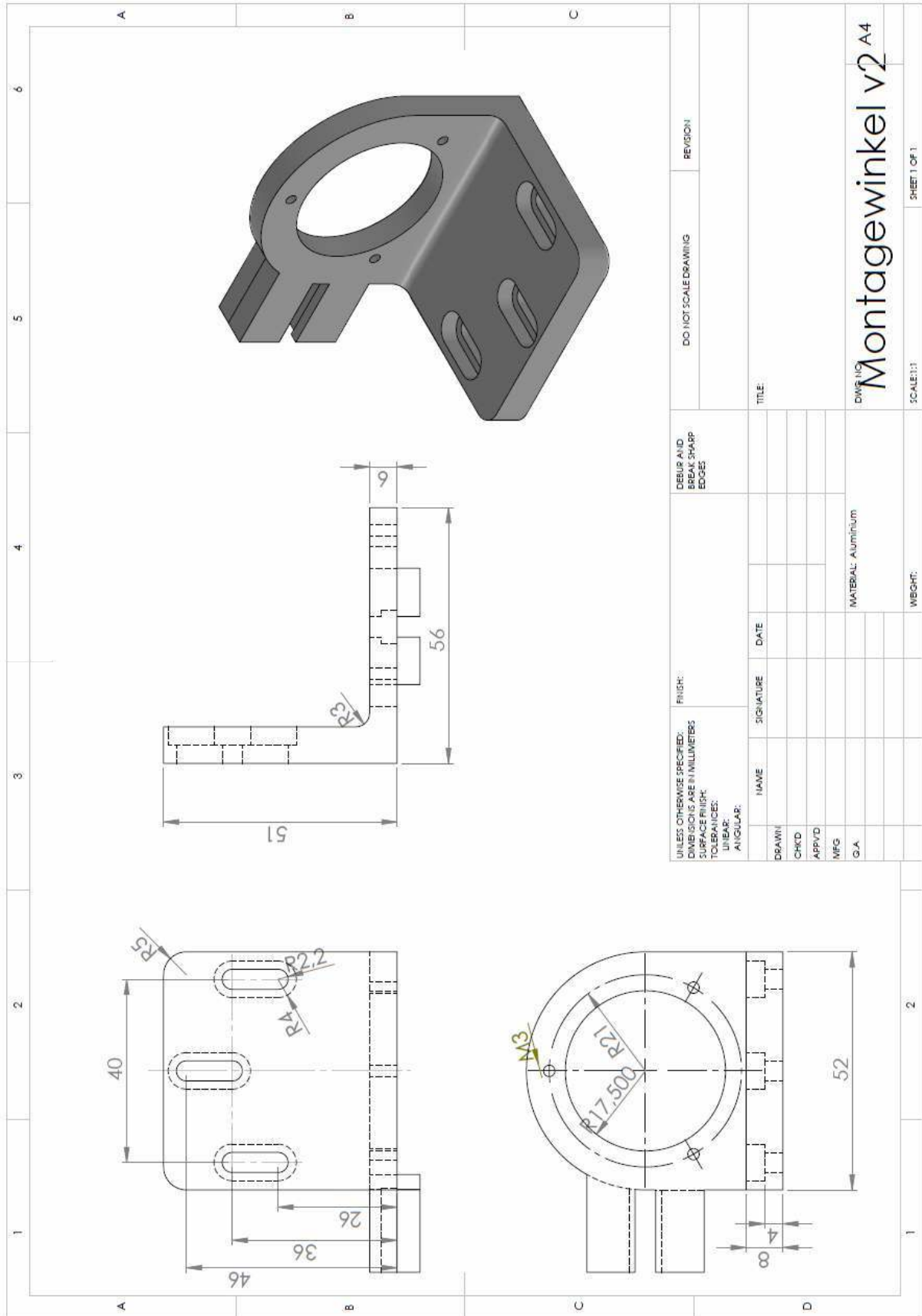
WEIGHT: 74gr

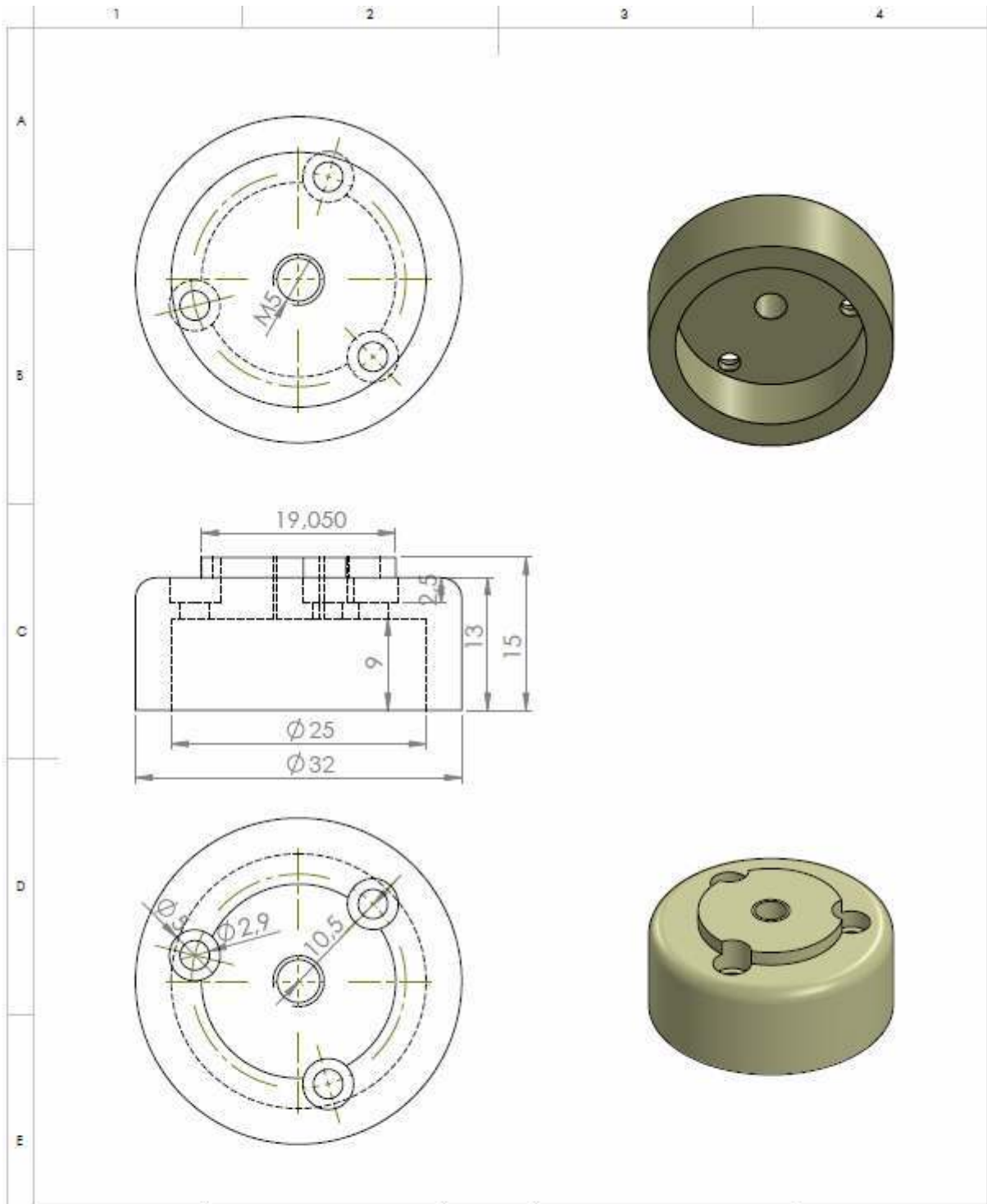
2

1









UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D									
APP'VD									
MFG.									
D.A.				MATERIAL:		DWG NO.		A4	
						Schleifscheibenhalter_1			
				WEIGHT: 19gr		SCALE: 2:1		SHEET 1 OF 1	

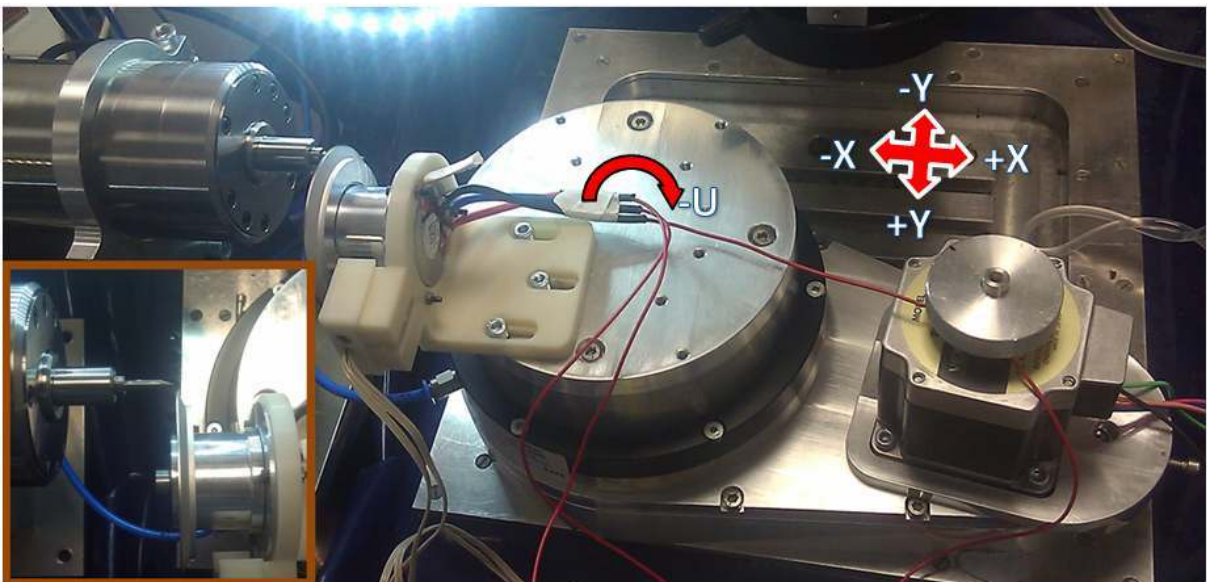
7 Θέση σε λειτουργία

Επειδή η υπό κατασκευή μηχανή δεν είχε ακόμη ολοκληρωθεί, έπρεπε το τμήμα που ολοκληρώθηκε (έλειπε μόνο το γραμμικό τραπέζι, το οποίο είχε παραγγελθεί) να δοκιμαστεί μεμονωμένα. Επίσης θα δοκιμαστεί να κατασκευαστεί ένα μικροεργαλείο. Προκειμένου να εκπληρωθούν οι στόχοι της εργασίας, απομένουν να διεκπεραιωθούν οι παρακάτω εργασίες :

- Τοποθέτηση της κατασκευής επάνω σε X-Y τραπέζι
- Τοποθέτηση της ατράκτου που φέρει το εργαλείο
- Έλεγχος των κινητήρων των α) X-Y τραπέζιού, β) περιστροφικού τραπέζιού
- Διαδικασία κατασκευής μικροεργαλείου

7.1 Τοποθέτηση επάνω σε X-Y τραπέζι

Στο εργαστήριο παραγωγής του πανεπιστημίου υπάρχει μια υψηλής ακρίβειας μηχανή κατεργασίας CNC, της οποίας το X-Y τραπέζι μας είναι κατάλληλο για την αναγκαία δοκιμή. Τα συναρμολογημένα κομμάτια τοποθετήθηκαν προσωρινά επάνω στο τραπέζι αυτό, όπως φαίνεται και στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 84, πειραματική διάταξη και ονομασία αξόνων

7.2 Τοποθέτηση της ατράκτου

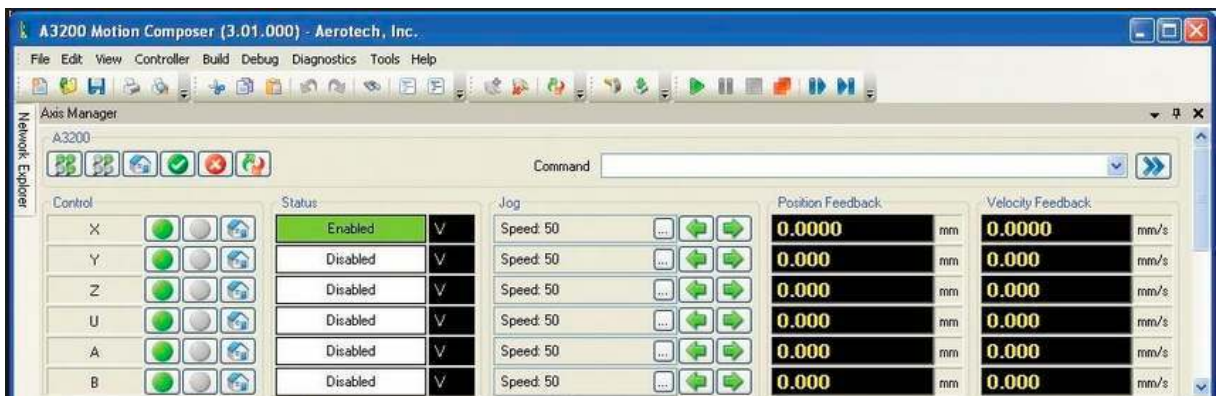
Το επόμενο βήμα ήταν η τοποθέτηση της ατράκτου που φέρει το υπό κατασκευή μικροεργαλείο δίπλα στο X-Y τραπέζι. Επειδή η θέση αυτή ήταν προσωρινή, στερεώθηκε εκεί με την βοήθεια δύο σφικτήρων. Η παράλληλη θέση του τραπεζιού με την άτρακτο εξασφαλίστηκε με την χρήση συσκευής μέτρησης με αισθητήρα αφής (Εικόνα 85).



Εικόνα 85, μέτρηση της παραλληλίας

7.3 Έλεγχος των αξόνων

Για τον έλεγχο των βηματικών κινητήρων χρειάζεται κατά πρώτων ένας ελεγκτής και κατά δεύτερον κατάλληλο λογισμικό. Στο εργαστήριο υπήρχε ήδη ο ελεγκτής Nstep και το λογισμικό A3200 της εταιρείας Aerotech (Εικόνα 86), τα οποία πληρούσαν τις απαιτήσεις της εργασίας και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν κατά την δοκιμή.

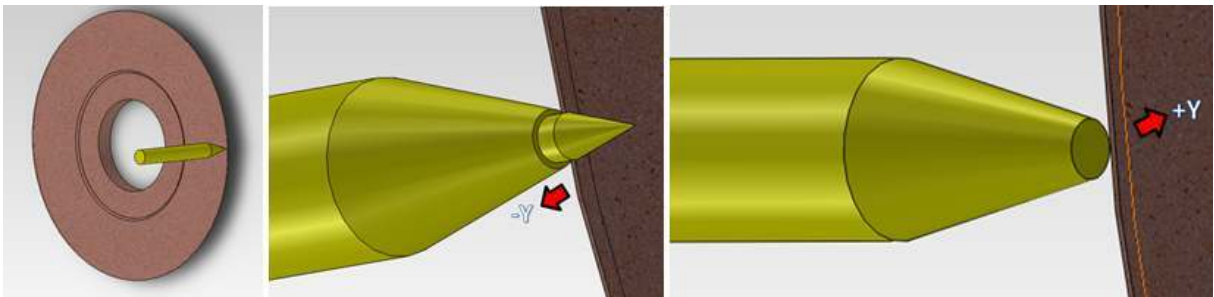


Εικόνα 86, λογισμικό Aerotech A3200

7.4 Διαδικασία κατασκευής και αποτελέσματα

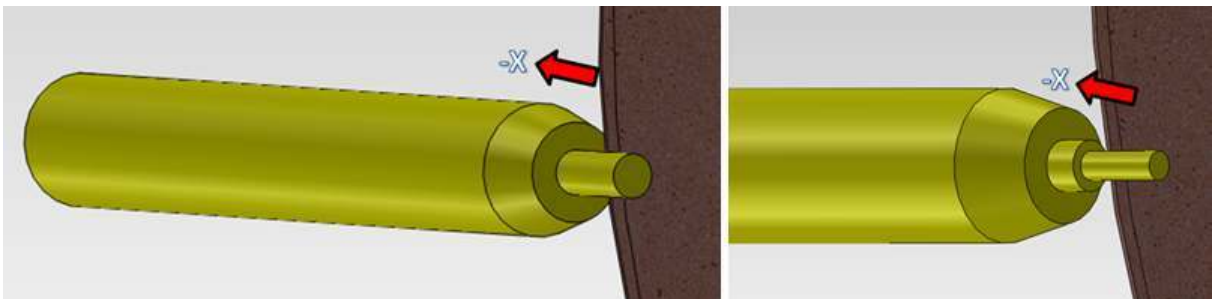
Μετά την επιτυχημένη λειτουργία των αξόνων ήμασταν σε θέση να πραγματοποιήσουμε την κατασκευή ενός νέου μικροεργαλείου. Το κυλινδρικό ακατέργαστο κομμάτι είχε διάμετρο 3,175 mm και από την μια του πλευρά ήταν κωνικό. Η άτρακτος που φέρει υποδοχή για το εργαλείο, μπορεί να επιτύχει ένα ρυθμό περιστροφής μέχρι και 120.000 rpm.

Αρχικά έπρεπε να οριστούν οι μηδενικές θέσεις των αξόνων X και Y. Για τον λόγο αυτό λειάνθηκε η κορυφή που υπήρχε μέχρι το σημείο πλήρης αποκοπής (Εικόνα 87). Στο σημείο που αποκόπηκε η κορυφή από το υπόλοιπο κομμάτι βρίσκεται η μηδενική θέση τόσο του άξονα X όσο και του άξονα Y.



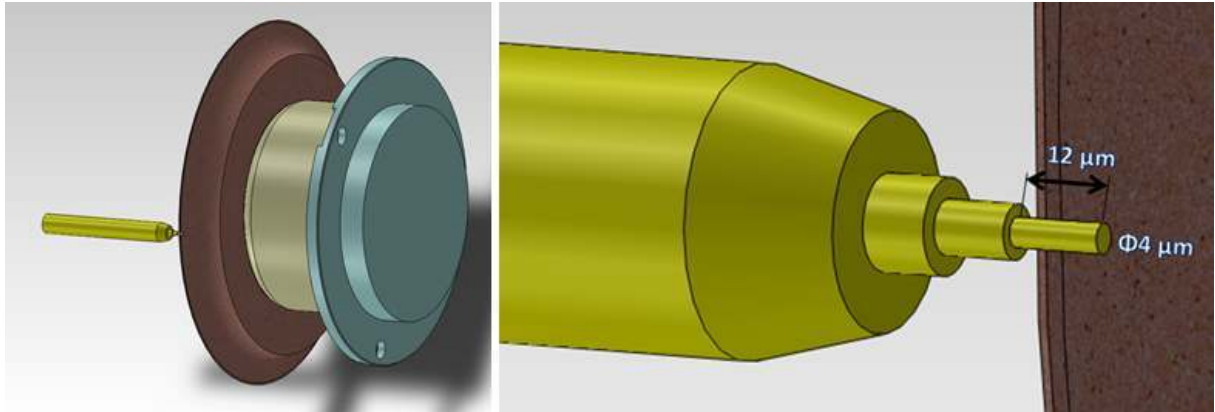
Εικόνα 87, βήματα κατασκευής ενός μικροεργαλείου

Έπειτα απομακρύνουμε τον δίσκο λείανσης κατά μερικά μm (π.χ. 150 μm) στην κατεύθυνση +Y και αμέσως μετά κατευθυνόμαστε προς -X με πολύ αργή πρόωση 0.1 mm / λεπτό και για διαδρομή 300 μm (Εικόνα 88). Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται κύλινδρος διαμέτρου 300 μm και μήκους 300 μm . Τα τελευταία βήματα επαναλαμβάνονται αρκετές φορές μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή διάμετρος.

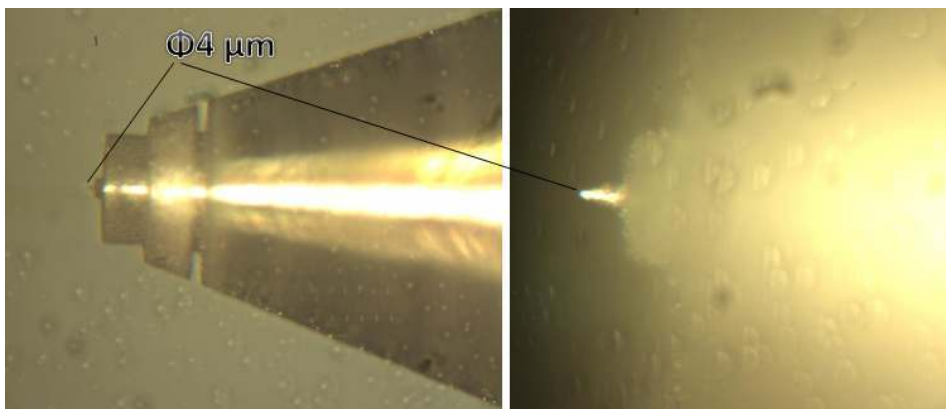


Εικόνα 88, βήματα κατασκευής ενός μικροεργαλείου

Με αυτή την διαδικασία επιτεύχθηκε διάμετρος εργαλείου 4 μm και μήκους 12 μm (Εικόνα 89, Εικόνα 90). Η αναλογία μήκους προς διάμετρο 3 προς 1 που επιτεύχθηκε θεωρείται ιδανική, η επιφάνεια όμως θα μπορούσε να γίνει και καλύτερη. Επειδή χρησιμοποιήθηκε μόνο ένας δίσκος λείανσης μεσαίου μεγέθους κόκκου (#3000), μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι η διαδικασία μπορεί να βελτιστοποιηθεί με την χρήση επιπλέον δεύτερου λεπτόκοκκου δίσκου. Επιπλέον μια πιο αργή πρόωση θα επιτύχει σίγουρα καλύτερα αποτελέσματα.



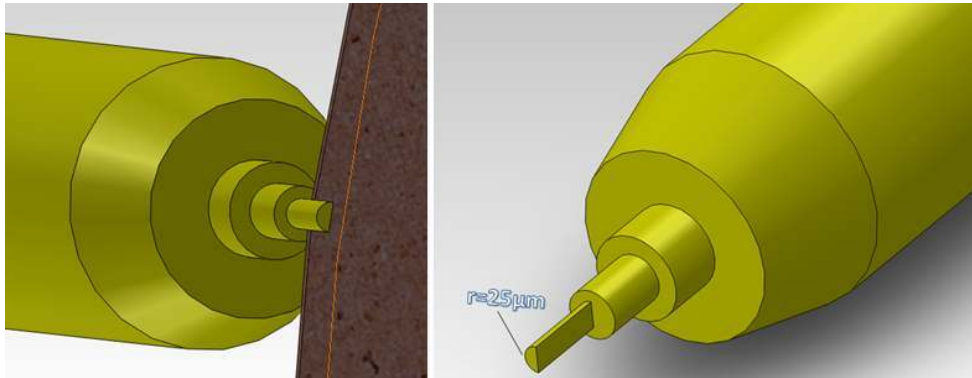
Εικόνα 89, βήματα κατασκευής ενός μικροεργαλείου



Εικόνα 90, μικροεργαλείο διαμέτρου 4 μm

Εδώ να σημειωθεί ότι προκειμένου να δημιουργηθούν οι κατάλληλες κοπτικές ακμές του εργαλείου απαιτούνται επιπλέον βήματα και πολύπλοκοι υπολογισμοί που αφορούν την γεωμετρία της μηχανής και την τροχιά των κοπτικών δίσκων. Λόγο το ότι η νέα μηχανή δεν είχε ακόμη ολοκληρωθεί, τα βήματα αυτά δεν μπορούσαν να πραγματοποιηθούν.

Μια άλλη εκδοχή ενός μικροεργαλείου φαίνεται στην επόμενη εικόνα. Η διάμετρος σε αυτή την εκδοχή ήτανε 50 μm και το μικροεργαλείο θυμίζει εργαλείο φρεζαρίσματος.



Εικόνα 91, βήματα κατασκευής ενός μικροεργαλείου



Εικόνα 92, μικροεργαλείο διαμέτρου 50 μm

8 Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής διαπιστώνει κανείς ότι μέσω της λείανσης είναι δυνατή η κατασκευή μικροεργαλείων με διάμετρο ίσως και μικρότερη των 4 μm. Η μηχανή που βρίσκεται υπό κατασκευή αποτελείται από εξαρτήματα υψηλής ακρίβειας, τα περισσότερα των οποίων αγοράστηκαν από το εμπόριο. Το κόστος απόκτησής τους κυμάνθηκε περίπου στις 55.000 € και είναι κατά δεκάδες φορές χαμηλότερο σε σχέση με την αγορά μιας έτοιμης μηχανής.

Η αντίστοιχη μηχανή που ενσωματώνει όλες τις καινοτομίες δεν υπάρχει στο εμπόριο σαν ενιαία και μπορεί να βρεθεί μόνο σε δύο ή περισσότερες ανεξάρτητες μηχανές.

Το τελικό κόστος βέβαια θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει και την περίπου δύο ετών εργασία ενός ατόμου, όσο δηλαδή διήρκεσε συνολικά η έρευνα, σχεδίαση και κατασκευή της νέας μηχανής.

Συμπερασματικά πρόκειται για μια νέα τεχνολογία η οποία μπορεί κάποια στιγμή να εισαχθεί και στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο με σχετικά μικρό κόστος. Τα οφέλη θα είναι πολλαπλά καθώς η μικροτεχνολογία συναντάται πλέον πολύ συχνά στην σύγχρονη βιομηχανία όπως μικροηλεκτρονική, βιοτεχνολογία, αυτοκινητοβιομηχανία, αεροπλοΐα, επικοινωνίες, οπτική κ.α.

Με την εισαγωγή λοιπόν της παραπάνω τεχνολογίας στο ΕΜΠ, θα δοθεί αρχικά η δυνατότητα να αναπτυχθούν νέα καινοτόμα μικροεργαλεία και έπειτα μέσω της έρευνας να βελτιωθούν ώστε να εμφανίζουν μικρότερη φθορά, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και μικρότερο κόστος. Επίσης μια συνεργασία με την τοπική βιομηχανία θα μπορούσε να ωφελήσει τόσο το ΕΜΠ όσο και την ίδια την βιομηχανία μέσω σχεδιασμού νέων προϊόντων και βελτίωσης της ανταγωνιστικότητας, όπως συμβαίνει ήδη στην περίπτωση του πανεπιστημίου του Kaiserslautern.

9 Βιβλιογραφία

- [Mahe10] Mahendran; Devarajan; Nagarajan; Majdi; : A Review of Micro-EDM, Hong Kong, 2010.
- [Dawe97] Dawes, R.C., Aspinwall: A review of ultra high speed milling of hardened steels, Elsevier Science S.A., 1997.
- [Kuni05] Kuniedaa, M. ; Lauwersb B.; Rajurkarc, K.P.; Schumacherd, B.M.: Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process, CIRP Annals, 2005.
- [Sloc92] Slocum, A.: Precision Machine Design, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1992.
- [Brec03] Brecher,C; Utsch, P.; Klar, R.; Wenzel, C.: Compact design for high precision machine tools, Elsevier Ltd., Aachen Germany, 2003.
- [Auri11] Aurich, J. ; Reichenbach, I. ; Walk, M. ; Carrella, M. : Detektion von Oberflächen in der spanenden Mikrobearbeitung, Werkstattstechnik online, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2011.
- [Take00] Takeuchia, Y.; Sakaidab, Y.; Sawadab, K.; Satac, T.: Development of a 5-Axis Control Ultraprecision Milling Machine for Micromachining Based on Non-Friction Servomechanisms, CIRP Annals, 2000.
- [Pica02] Picard, Y.N.; Adams, D.P.; Vasile, M.J.; Ritchey, M.B.: Focused ion beam-shaped microtools for ultra-precision machining of cylindrical components, Elsevier Ltd., USA, 2002.
- [Auri13] Aurich, Jan C.; Christopher, M.; Walk, M: High-frequency tool-spindle for multifunctional, replaceable, rotor-modules, Springer, Kaiserslautern, 2013.
- [Dong08] Dong-Yea Sheu : High-speed micro electrode tool fabrication by a twin-wire EDM system, National Taipei University of Technology, Taiwan, 2008.
- [Chae04] Chae, J.; Park, S.S.; Freiheit, T.: Investigation of micro-cutting operations, Elsevier Ltd, University of Calgary, Canada , 2005.
- [Alle09] Allen, D.M.; Shore, P.; Evans, R.W.; Fanara, C.; O'Brien, W. ; Marson, S.; O'Neill, W. : Ion beam, focused ion beam, and plasma discharge machining, CIRP Annals, 2009.
- [Ruß00] Ruß, August G.: Linearlager und Linearführungssysteme, Expert Verlag, 2000.
- [Alti11] Altintas Y.; Verl, A.; Brecher, C.; Uriarte, L.; Pritschow, G. : Machine tool feed drives, CIRP Annals, 2011.
- [Uria09] Uriarte, L.; Eguia, J.; Egaña, F. : Machine Tools for High Performance Machining, Springer Verlag, London, 2009.

- [Auri12]** Aurich, Jan C.; Reichenbach, Ingo G.; Schüler, Guido M.: Manufacture and application of ultra-small micro end mills, CIRP Annals, University of Kaiserslautern, 2012.
- [Bohl10]** Bohley, M.: Konzepterstellung und Konstruktion einer Desktop-Werkzeugschleifmaschine zur Herstellung und Anwendung von Mikroschleifstiften, Diplomarbeit, TU Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2010.
- [Alti03]** Alting, L.; Kimura, F.; Hansen, H.N.; Bissacco, G. : Micro Engineering, CIRP Annals, 2003.
- [Walk11]** Walk, M.; Carrella, M.; Schueler, G.M.; Engmann, J.; Aurich, J.C. : Micro Pencil Grinding Tools: Manufacturing, Application, and Results, University of Kaiserslautern, 2011.
- [Schu09]** Schueler, G. M. ; Engmann, J. ; Marx, T. ; Haberland, R.; Aurich, J. C. : Micro Structuring of Biocompatible Titanium-Alloys with Ultra-small Micro-End Mills, University of Kaiserslautern, 2009.
- [Zhan12]** Zhang, Zhiyu ; Peng, Huanming ; Yan, Jiwang : Micro-cutting characteristics of EDM fabricated high-precision polycrystalline diamond tools, ElsevierLtd., 2012.
- [Vasi96]** Vasile, Michael J.; Friedrich, Craig R.; Kikkeri, Bharath; McElhannon, Rob : Micrometer-scale machining: tool fabrication and initial results, Elsevier Science Inc., Louisiana Tech University, USA, 1996.
- [Adam00]** Adamsa, David P.; Vasileb, Michael J.; Benavidesa, Gilbert; Campbella, Ann N.: Micromilling of metal alloys with focused ion beam–fabricated tools, Elsevier Science Inc, 2000.
- [Scha99]** Schaller, Th.; Bohn, L.; Mayer, J.; Schubert, K. : Microstructure grooves with a width of less than 50 nm cut with ground hard metal micro end mills, Elsevier Science Inc., Karlsruhe Research Center (FZK), 1999.
- [Venk07]** Venkatesh, V.C.; Izman, Sudin : Precision Engineering, Tata McGraw-Hill Publishing Company, USA, 2007.
- [Morg03]** Morgan, Chris; Shreve, Shelby; Vallance, R. Ryan : Precision of micro shafts machined with Wire Electro-Discharge Grinding, Winter Topical Meeting, University of Kentucky, USA, 2003.
- [Masu00]** Masuzawa, T : State of the Art of Micromachining, Institute of Industrial Science, Annals of the CIRP, University of Tokyo, Japan, 2000.

- [Cama12]** Camara, M.A. ; Rubio, J.C. Campos; Abrao, A.M.; Davim, J.P. : State of the Art on Micromilling of Materials, a Review, Journal of Materials Science & Technology, 2012.
- [Auri10]** Aurich, Jan c. : Strukturgrößen unter 10 µm wirtschaftlich fertigen, MM Maschinenmarkt 26, Kaiserslautern, 2010.
- [Cher06]** Chern, Gwo-Lianq; Engin Wu, Ying-Jeng; Cheng Cheng, Jyun; Yao, Jian-Cheng : Study on burr formation in micro-machining using micro-tools fabricated by micro-EDM, Elsevier Inc., National Yunlin University of Science and Technology, Taiwan, 2006.
- [Egas02]** Egashira, K. ; Mizutani, K. : Ultrasonic Vibration Drilling of Microholes in Glass, CIRP Annals, 2002.
- [Klei99]** Klein Wernen, Utrapräzisionsbearbeitung mit Schrittmotor-Achsantrieben, Doktorarbe, TU Kaiserslautern, 1999.
- [Goto13]** Gotoha, H.; Tania, T. ; Okadaa, M. ; Gotob, A.; Masuzawac, T.; Mohri, N. : Wire electrical discharge milling using a wire guide with reciprocating rotation, 17th CIRP Conference, 2013.
- [Masu85]** Masuzawa, T. ; Fujino, M.; Kobayashi, K. : Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining, Annals of the CIRP Vol. 34, 1985.
- [Raim09]** Raimund, P.: Handbuch Zahnriementechnik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [Masu08]** Masuzawaa, T. ; Fujinoa, M.; Kobayashia, K.; Suzukib, T.; Kinoshita N. : Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining, CIRP Annals, 2008.
- [Cont05]** Continental : Zahnriemen, ContiTech AG, 2005.
- [Cont12]** Continental : Synchroflex Polyurethane Timing Belts- Overall catalog, 2012.
- [Opti13]** Optibelt: Technisches Handbuch Zahnriemenantriebe Polyurethan, 2013.
- [Gate11]** Gates Mectrol : Urethane Timing Belts and Pulleys, 2011.
- [Ori14]** Orientalmotor : Scrittmotor CRK566PMBP, <http://www.orientalmotor.de/Products/Stepper_motors/Dc_motor_driver_packages/Without_integrated_controller/5phase_microstep_crk/?&arid=2057&dwn=artnr>, 2014.
- [Aero14]** Aerotech Inc. ANT130-L Series Single-Axis Linear Direct-Drive, <http://www.aerotech.com/product-catalog/stages/linear_stages/ant130-l.aspx>, 2014.

10 Παράρτημα - Πρωτότυπη εργασία στα γερμανικά

Στις επόμενες σελίδες ακολουθεί η πρωτότυπη εργασία στα γερμανικά όπως αυτή κατατέθηκε στο πανεπιστήμιο υποδοχής. Γίνεται εκ' νέου αρίθμηση των κεφαλαίων, σελίδων και εικόνων.

Masterarbeit

Aufbau und Anwendung eines ultrapräzisen
luftgelagerten Drehtisches für die Implementierung
und Nutzung in einer Desktop-Werkzeugmaschine

Construction and application of a high precision air
bearing rotational stage for the implementation and use
in a small desktop size machine tool.



Prof. Dr.-Ing. Georgios Vosniakos
Abteilung für Fertigungstechnologie
Nationale Technische Universität Athen (N.T.U.A.)



Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich
Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation
Technische Universität Kaiserslautern (T.U.KL.)

Betreuer: Dipl. Ing. Martin Bohley

Name: Makris Ioannis

Anschrift: Kurt Schumacher Straße 8
67663 Kaiserslautern

Matrikelnummer: 391746

Kaiserslautern, Juli 2014





This project was completed as part of the postgraduate programme co-financed by the Act "Scholarships programme SSF (State Scholarships Foundation) with an individualized assessment process of the Academic Year 2012-2013" from resources of the Operational Programme "Education and Lifelong Learning", of the European Social Fund (ESF), the NSRF 2007-2013.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
1 Einleitung.....	1
2 Ziel der Arbeit.....	2
3 Stand der Technik.....	3
3.1 Prozesse zur Herstellung von Mikrofräsern.....	3
3.1.1 Drahterodieren (Wired Electro-Discharge Grinding)	3
3.1.2 Fokussierte Ionenstrahlen (FIB).....	6
3.1.3 Schleifen.....	8
3.2 Elemente der Werkzeugmaschinen.....	10
3.2.1 Führungen und Lagerungen	10
3.2.2 Getriebe.....	15
4 Beschreibung der neu entwickelten Maschine	20
5 Bauteile der Konstruktion	22
5.1 Rundtisch	22
5.2 Lineartisch.....	23
5.3 Übertragung des Drehmoments	25
5.3.1 Vorauswahl des Zahnriemenprofils.....	26
5.3.2 Übertragungsgenauigkeit, Verdrehsteifigkeit	27
5.3.3 Höchstzahl und notwendiges Beschleunigungsdrehmoment	27
5.3.4 Bestimmung der Anzahl der Zähne nach Continental Katalog	28
5.3.5 Berechnung der Riemenbreite.....	28
5.3.6 Berechnung der Riemenlänge	29
5.3.7 Berechnung der Verdrehsteifigkeit und des Verdrehwinkels	29
5.3.8 Berechnung der Vorspannkraft (Fv).....	31
5.4 Zahnriemenantrieb	32
5.5 Vorspannbauteil.....	34
5.6 Schleifscheibe und Antrieb	35
5.7 Schleifscheibenhalter	37
5.8 Drehzahlsteuerung der Schleifscheibe	38
5.8.1 Elektronischer Drehzahlregler (E.S.C.).....	38
5.8.2 Mikrocontroller	39
5.8.3 Infrarotsensoren.....	40
5.8.4 Schaltkreis	41
5.8.5 Programm.....	42
5.8.6 Aufbau und Test der Schaltung	44
5.8.7 Leiterplatte.....	45
5.8.8 Gehäuse	46
5.9 Schleifscheibenmotor-Halter, Led-Halter.....	47

5.10	Basis.....	48
5.11	Wellenflansch	50
5.12	Riemendeckel.....	50
5.13	Montageplatte.....	51
5.14	Zusammenbauzeichnungen	52
5.15	Zusammenbau der Bauteile	54
6	Konstruktionszeichnungen.....	56
7	Inbetriebnahme	63
7.1	Aufstellung der Baugruppe auf einem X-Y-Tisch.....	63
7.2	Montage der Spindel	64
7.3	Steuerung der Achsen.....	64
7.4	Herstellungsprozess und Ergebnisse	65
8	Zusammenfassung	68
9	Literaturverzeichnis.....	69

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1, Konzept der neuen Maschine	2
Abbildung 2, Grundsätze von WEDG [Morg03]	4
Abbildung 3, Herstellungsprozess eines Mikrowerkzeuges durch WEDG [Cher06]	4
Abbildung 4, Seitenansicht eines Mikrowerkzeuges [Cher06]	5
Abbildung 5, Herstellungsprozess eines Mikrofräasers durch FIB [Adam00]	6
Abbildung 6, Mikrofräser mit 2, 4 und 6 Flächen [Adam00]	7
Abbildung 7, geometrische Eigenschaften eines Mikrofräasers [Auri12]	8
Abbildung 8, Entwurf einer 3-Achs-Desktop-Schleifmaschine [Auri12]	8
Abbildung 9, Herstellungsprozess der Mikrofräser durch Schleifen [Auri12]	9
Abbildung 10, Mikrofräser mit drei verschiedenen Steigungswinkeln [Auri12]	10
Abbildung 11, hydrodynamische Führung [Venk07]	11
Abbildung 12, hydrostatische Führung [Alti11]	11
Abbildung 13, aerostatische Führung [Uria09]	13
Abbildung 14, verschiedene wälzgelagerte Führungen [Alti11]	13
Abbildung 15, magnetisch schwebender Tisch [Alti11]	14
Abbildung 16, Festkörpergelenksführung. (a) Ursprüngliche Position, (b) Deformiert [Uria09]	15
Abbildung 17, Zahnstange-Ritzel-System mit elektrischer Vorspannung [Alti11]	16
Abbildung 18, Kugelumlaufspindel [Alti11]	16
Abbildung 19, Schraubenmutter Mechanismen [Alti11]	16
Abbildung 20, Kugelumlaufspindel-Systeme [Alti11]	17
Abbildung 21, Reibungsantrieb [Venk07]	17
Abbildung 22, Linearmotor [Uria09]	18
Abbildung 23, Entwurf der entwickelten Maschine	20
Abbildung 24, Benennung der Teile	22
Abbildung 25, Rundtisch der Firma LT Ultra	23
Abbildung 26, 3D-Zeichnungen des Rundtisches	23
Abbildung 27, technische Eigenschaften des Lineartisches [Aero14]	24
Abbildung 28, Aerotech ANT130-110-L	25
Abbildung 29, 3D-Zeichnung des Lineartisches	25
Abbildung 30, erste Variante : Direktantrieb	26
Abbildung 31, Auswahl des Zahnriemenprofils [Opti13]	26
Abbildung 32, Zahnriemenprofil AT5 [Gate11]	27

Abbildung 33, erwünschter Drehwinkel	28
Abbildung 34, erwünschte Beschleunigungszeit	28
Abbildung 35, Bestimmung der Werte von Mspez und Fspez [Cont12]	29
Abbildung 36, Riemenlänge Vorauswahl [Cont12]	29
Abbildung 37, Zahngetriebe Modell [Raim09].....	30
Abbildung 38, Bestimmung der zulässigen Zugkraft [Cont12].....	30
Abbildung 39, Bestimmung der spezifischen Steifigkeit [Raim09]	31
Abbildung 40, Riemenkräfte [Cont12].....	31
Abbildung 41, spielfreie Übertragung durch Übervorspannung [Raim09].....	32
Abbildung 42, normale, enge und null Lücke [Cont12].....	32
Abbildung 43, 3D-Zeichnungen des Schrittmotors	33
Abbildung 44, technische Daten CRK566PMBP [Ori14]	33
Abbildung 45, Riemendehnung Berechnung.....	34
Abbildung 46, Vorspannmechanismus	34
Abbildung 47, Schleifscheibe Disco NBC-ZH204J	35
Abbildung 48, Konzept der ersten Lösung	35
Abbildung 49, Messgerät des Rundlauffehlers	36
Abbildung 50, Ergebnisse des Spindle Error Analysers	36
Abbildung 51, bürstenloser Festplattenmotor	37
Abbildung 52, Zusammenbauen Motor - Schleifscheibe	37
Abbildung 53, Feinbearbeitung des Schleifscheibenhalters	37
Abbildung 54, LT-Ultra MTC250, Ultrapräzise Drehmaschine.....	38
Abbildung 55, Erregung der Spulen	39
Abbildung 56, ESC-Anschlüsse.....	39
Abbildung 57, Impulsformen zur ESC-Steuerung.....	40
Abbildung 58, Prinzip des Drehzahl-Messsystems.....	40
Abbildung 59, Bauteil nach der Laser-Bearbeitung	41
Abbildung 60, Gesamtschaltplan.....	41
Abbildung 61, Aufbau und Test des Schaltkreises	44
Abbildung 62, Aufbau und Test des Schaltkreises	44
Abbildung 63, erste Platine.....	45
Abbildung 64, zweite Platine	45
Abbildung 65, Bauteile des Gehäuses (3D Zeichnungen).....	46
Abbildung 66, Zusammenbau des Gehäuses.....	47
Abbildung 67, Speed Controller - fertiges Gerät.....	47

Abbildung 68, Schleifscheibenmotor-Halter mit Led-Halter	48
Abbildung 69, erzeugter Motorhalter Komplett	48
Abbildung 70, Basis.....	48
Abbildung 71, Zusammenbau der Basis.....	49
Abbildung 72, fertige Basis.....	49
Abbildung 73, Wellenflansch	50
Abbildung 74, Zusammenbau des Wellenflansches.....	50
Abbildung 75, hergestellter Riemendeckel	51
Abbildung 76, Zusammenbau des Riemendeckels	51
Abbildung 79, Montageplatte.....	51
Abbildung 80, Explosionsdarstellung.....	52
Abbildung 81, seitlicher Querschnitt.....	53
Abbildung 82, Zusammenbauzeichnung	53
Abbildung 83, Montagereihenfolge der Bauteile.....	54
Abbildung 84, Montagereihenfolge der Bauteile.....	54
Abbildung 85, Montagereihenfolge der Bauteile.....	54
Abbildung 86, Montagereihenfolge der Bauteile.....	54
Abbildung 87, Montagereihenfolge der Bauteile.....	55
Abbildung 86, Versuchsaufbau und Benennungen der Achsen	63
Abbildung 87, Messung der Parallelität.....	64
Abbildung 88, Software Aerotech A3200.....	64
Abbildung 89, Herstellungsschritt eines Mikrowerkzeuges.....	65
Abbildung 90, Herstellungsschritt eines Mikrowerkzeuges.....	65
Abbildung 91, Herstellungsschritt eines Mikrowerkzeuges.....	66
Abbildung 92, Erzeugtes Mikrowerkzeug mit Durchmesser 4 μm	66
Abbildung 95, Herstellungsschritt eines Mikrowerkzeuges.....	67
Abbildung 96, Erzeugtes Mikrowerkzeug mit Durchmesser 50 μm	67

1 Einleitung

Die Miniaturisierung von mechanischen Bauteilen wird von einigen Wissenschaftlern als Anforderung für die zukünftige technologische Entwicklung eines breiten Spektrums von Produkten empfunden. Verschiedene Industrien wie Mikroelektronik, Biotechnologie, Automobil-, Luft- und Raumfahrt-, Umwelt- und Kommunikationstechnik sowie Optik fordern immer mehr hochpräzise, miniaturisierte Bauteile. Diese Bauteile können sowohl einen geringeren Stromverbrauch als auch eine höhere Wärmeübertragungsrate bieten, denn ihr Verhältnis Oberfläche zu Volumen ist sehr hoch. Zudem zeigen Untersuchungen, dass Mikrobearbeitungsmaschinen im Vergleich zu konventionellen CNC Maschinen sehr effizient sind. Laut L. Altings Definition [Alti03], Mikrotechnik beschäftigt sich mit der Entwicklung und Herstellung von Produkten, deren funktionale Merkmale oder mindestens eine Dimension in der Größenordnung von Mikrometern liegen.

Die mikromechanische Bearbeitung ist ein Verfahren geeignet für die Herstellung von dreidimensionalen Miniatur-Geräten und Komponenten, deren Größe zwischen zehn oder weniger Mikrometer und einige Millimeter liegt, während die meistgenutzten Werkstoffe Metalllegierungen, Keramik und Polymermaterialien sind.

Damit man Mikro-Komponenten erzeugen kann, wird am Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation (FBK) eine ultrapräzise Desktop-Werkzeugmaschine entwickelt und aufgebaut. Wenn die Maschine fertig ist, wird die Herstellung von Mikrofräswerkzeugen mit einem Durchmesser von 3 μm möglich sein.

In dieser Diplomarbeit soll ein ultrapräziser Zwei-Achs-Drehtisch entwickelt, hergestellt und geprüft werden, der ein Bauteil der oben erwähnten Maschine ist. Auf dem Drehtisch werden zwei Schleifspindeln montiert, die einen effizienten Schleifprozess garantieren.

2 Ziel der Arbeit

Am Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation Kaiserslautern (FBK) gibt es seit 2012 eine ultrapräzise Desktop-Werkzeugmaschine, die die Fertigung von Mikrofräsern mit 7 μm Durchmessern ermöglicht. Daneben gibt es eine Hochpräzisions-Desktop-Bearbeitungsmaschine zur Anwendung des Mikrofräsers. Zur Eliminierung des Rundlauffehlers wegen der Umspannvorgänge des Werkzeugs wird eine neue Maschine entwickelt. Das Konzept der Maschine ist (siehe Abbildung 1), dass sowohl die Herstellung als auch die Anwendung des Mikrowerkzeugs auf derselben Maschine stattfindet. Zudem wird die Erzeugung von Mikrofräsern mit Durchmessern bis 3 μm möglich sein. Auf folgendem Bild ist der Entwurf der Maschine zu sehen, der Träger der Schleifscheibenmotoren ist rot hervorgehoben.

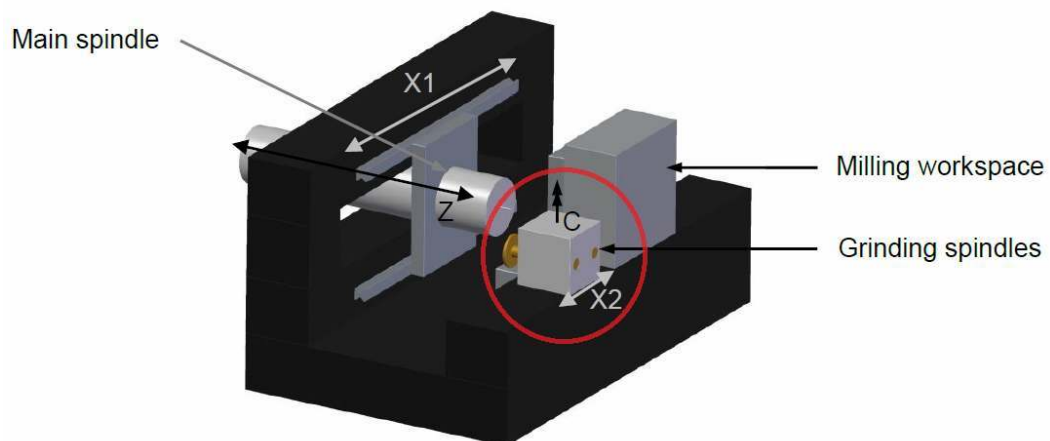


Abbildung 1, Konzept der neuen Maschine

Ziel der Arbeit ist der Aufbau eines ultrapräzisen Drehtisches, der auf einer Linearführung montiert wird. Gleichzeitig müssen nicht nur die technischen Daten des Motors bestimmt werden, der für die Bewegung des Drehtisches verantwortlich ist, sondern auch die Art der Getriebe (z.B. Direktantrieb, Zahnriemen, u.s.w.). Auf dem Tisch werden zwei bürstenlose Motoren montiert, die das notwendige Drehmoment auf die Schleifscheibe übertragen müssen. Für die Steuerung der Motoren muss ein Controller entwickelt und aufgebaut werden. Am Ende findet der Zusammenbau der Bauteile sowie die Inbetriebnahme der gesamten Konstruktion statt.

3 Stand der Technik

3.1 Prozesse zur Herstellung von Mikrofräsern

Mikro-Bearbeitung muss Präzisionsbearbeitung sein, um Miniatur-Komponenten innerhalb sehr enger Toleranzen herzustellen. Die Qualität der fertigen Komponenten hängt von der Maschine und den Mikrowerkzeugen ab. Dennoch ist die begrenzte Verfügbarkeit von Mikrowerkzeugen immer ein großes Problem in der Mikro-Bearbeitung. Unzuverlässige Werkzeuglebensdauer und früher Ausfall des Werkzeuges sind noch zwei wichtige Probleme bei der Verwendung von Mikro-Werkzeugen. In der Literatur finden sich zahlreiche Verfahren zur Herstellung von Mikrofräsern. Gemäß Masuzawa [Masu00] gehören die meisten dieser Prozesse zu den weiter unten aufgeführten Arten von Mikrobearbeitungsprozesse:

- Materialentfernung durch Schmelzen und Verdampfen
- Materialentfernung durch Abtragung
- Materialentfernung durch mechanische Kraft

Anschließend werden drei typische Mikrofräserherstellungsprozesse erwähnt und erklärt.

3.1.1 Drahterodieren (Wired Electro-Discharge Grinding)

Electro Discharge Machining (EDM) ist auf einer einfachen Theorie basiert. Wenn zwei Elektroden durch ein dielektrisches Medium getrennt sind und sie kommen näher zueinander, das dielektrische Medium, das anfänglich nicht leitend war, bricht und es wird leitend. In diesem Moment werden Funken zwischen den Elektroden erzeugt. Die thermische freigesetzte Energie wird durch Schmelzen und Verdampfen für die Materialentfernung verwendet. Durch genaue Steuerung der freigesetzten Energie ist es möglich, Mikromerkmale auf jedem elektrischen leitenden Material zu bearbeiten. Der Nachteil dieser Methode ist, dass Elektroden verschleifen und während des Verfahrens erschöpft sein können. Eine alternative Technik wurde von Masuzawa erfunden und heißt Wire Electro-Discharge Grinding. [Masu08]

Die Grundsätze von WEDG sind schematisch auf der Abbildung 2 dargestellt. Elektrische Entladung findet zwischen dem beweglichen Draht und der Elektrode statt, die durch eine dielektrische Flüssigkeit getrennt sind. Der Draht bewegt sich mit

einer Geschwindigkeit von 5 bis 10 mm / min eingeschränkt durch die Drahtführung. Die Elektrode dreht sich mit 3000 Umdrehungen pro Minute.

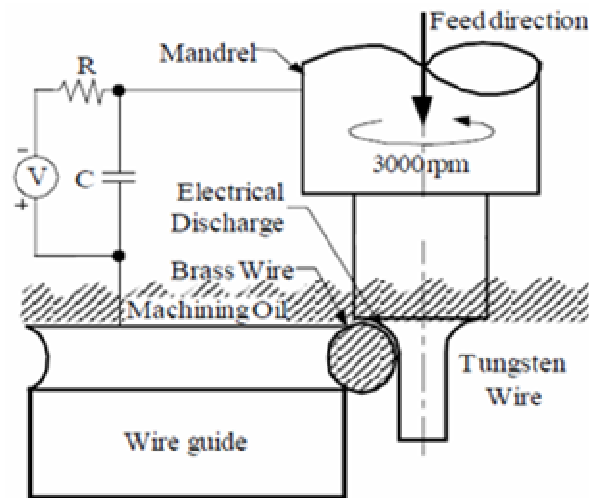


Abbildung 2, Grundsätze von WEDG [Morg03]

In [Cher06] ist der Herstellungsprozess eines Mikrowerkzeuges mit einem Durchmesser von 100 μm dargestellt. Zuerst (Abbildung 3a) wird das Mikro-Werkzeug durch WEDG auf den vorläufige Geometrie und Abmessung bearbeitet. Der Kreis "T" (Abbildung 3) stellt den Querschnitt des Drahtes, während "WEDG Path" die Bewegung der Drahtführung darstellt. Anschließend wird die Spindel gestoppt und das Mikro-Werkzeug wird auf seiner ersten Seite bearbeitet (Abbildung 3b). Das Mikro-Werkzeug wird danach in den winzigen Schlitz der Drahtführung bewegt, damit seine andere Seite bearbeitet werden kann (Abbildung 3c). Zuletzt wird das Mikro-Werkzeug mit der gewünschten Form und geometrischen Eigenschaften hergestellt.

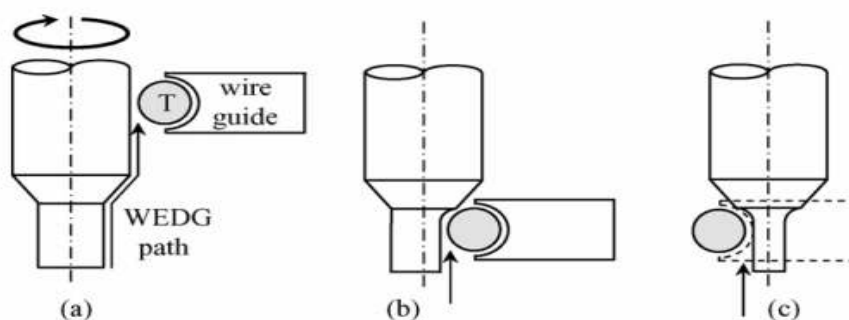


Abbildung 3, Herstellungsprozess eines Mikrowerkzeuges durch WEDG [Cher06]

Die Geometrie dieses Mikro-Werkzeugs ist ganz einfach. Es ist so geplant, sodass für die Durchführung einer Mikrobearbeitung geeignet ist, die im Wesentlichen eine Kombination von Mikro-Fräs- und Schleifverfahren ist. Die Oberfläche des Mikro-

Werkzeugs enthält zahlreiche kleine Krater und Oberflächenunebenheiten, die während des Mikro-EDM-Verfahrens erzeugt werden. Diese Krater und Oberflächenunebenheiten können einen Schleifvorgang durchführen. Darüber hinaus kann das Mikro-werkzeug als ein Mikrofräser mit zwei Hauptschneidkanten betrachtet werden. Der Werkstoff eines solchen Werkzeuges kostet etwa 3 USD. [Cher06]

Auf der Abbildung 4 ist die Seitenansicht eines Mikrowerkzeuges aus Wolframcarbid mit Abmessungen von $D=100\ \mu\text{m}$ und $W=40\ \mu\text{m}$ abgebildet.

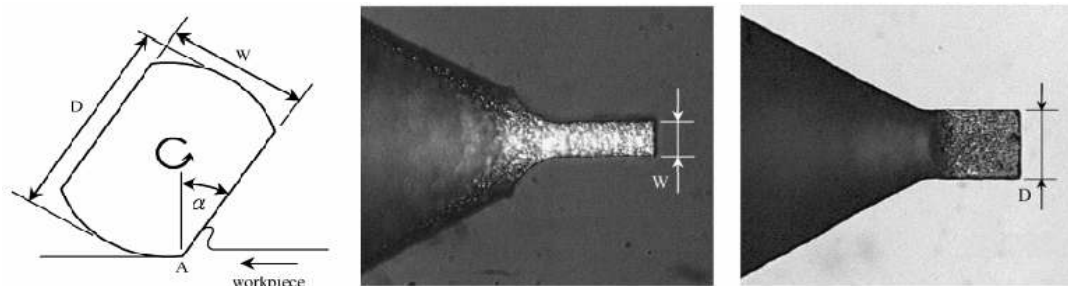


Abbildung 4, Seitenansicht eines Mikrowerkzeuges [Cher06]

Zudem wurde ein Mikrowerkzeug mit $D=31\ \mu\text{m}$ und $W=18\ \mu\text{m}$ hergestellt. Die Ergebnisse im Werkstücke aus Al 6061-T6 zeigten, dass die Grabenbreiten, die mit der Benutzung dieses Werkzeuges erzeugt wurden, 14.5 % größer als der Durchmesser des Mikrowerkzeuges waren. Dies zeigt, dass Maßfehler ein grundlegendes Problem ist, besonders wenn ein Mikro-Werkzeug in der Bearbeitung von metallischen Werkstoffen verwendet wird. [Cher06]

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass WEDG die folgenden Vorteile bietet:

- hohe Genauigkeit,
- gute Oberflächenqualität,
- Bearbeitung harter und schwer zerspanbare Werkstoffe ist möglich,

Die Nachteile dieses Verfahrens sind:

- geringe Produktivität,
- elektrische leitende Werkstoffe sind benötigt,
- lange Bearbeitungszeiten.

3.1.2 Fokussierte Ionenstrahlen (FIB)

Fokussierte Ionenstrahlen ist ein Prozess zum Bearbeiten von feinen Strukturen und äußerst feinen Details. Ionen kommen aus einer Plasmaquelle und sie werden auf die Oberfläche des Werkstückes gerichtet, wo sie kleine Mengen von Material entfernen. In [Alti03] ist berichtet, dass diese Mengen (Spotgröße) in kommerziellen FIB-Systemen in der Größenordnung von 10 nm bis 50 nm sind. Obwohl auf diese Weise detaillierte 3D-Strukturen erhalten werden können, sind die Materialentfernungsraten des Verfahrens in der Größenordnung von einigen $\mu\text{m}^3 / \text{s}$, relativ gering.

David P. Adams und sein Team benutzten fokussierte Ionenstrahlen [Adam00], um eine Vielzahl von Mikro-Fräswerkzeuge zu formen. Sie haben diese Technologie ausgewählt, weil bei dieser sowohl eine Vielzahl von Werkzeuggeometrie als auch scharfe Schneidkanten möglich sind. Es geht um eine gut kontrollierte Methode wegen der präzisen Strahlpositionierung und der Dosis-Verteilung. Ein anderer Vorteil der Methode ist, dass Ionenquellen, fokussierende Optiken und Strahlableiter extrem stabil über Hunderte von Stunden sind. Zudem, FIB ist ein Prozess, bei dem fast keine mechanische Spannung auf das Werkzeug wirkt und dadurch kann eine hohe Genauigkeit erreicht werden. [Adam00]

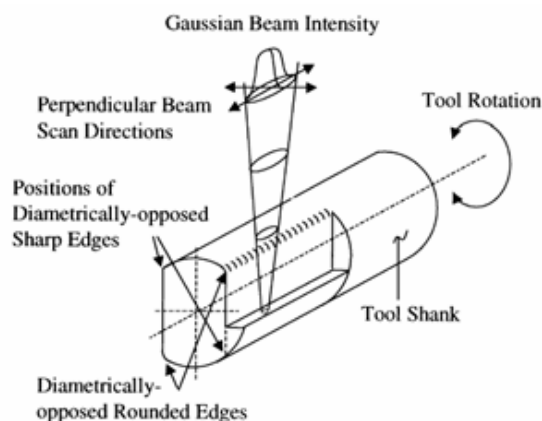


Abbildung 5, Herstellungsprozess eines Mikrofräsers durch FIB [Adam00]

Auf der Abbildung 5 ist der Herstellungsprozess eines Mikrofräsers abgebildet. Auf dem Werkzeug werden zwei Oberflächen mit insgesamt vier Kanten erzeugt. Die Facettenseiten, die während des FIB-Prozesses näher zu der Ionenquelle sind, haben ein relativ großer Krümmungsradius ($R_c \approx 1.0 \mu\text{m}$), während die entfernte Facettenseiten, wegen der Beschattung des Werkzeugschaftes, extrem scharf sind ($R_c \leq 0.1 \mu\text{m}$). Bei diesem Verfahren können zahlreiche Flächen und scharfe

Facettenkanten gebildet werden. Die Anzahl und Position der Flächen auf den Mikroschafffräser bestimmen eindeutig die Eigenschaften eines Werkzeuges, wie z. B. der Abstand zum Entfernen eines Chips oder die Drehrichtung des Werkzeuges beim Fräsen. Auf der Abbildung 6 sind drei Mikrofräser mit 2, 4 und 6 Flächen dargestellt, die durch einen FIB-Prozess hergestellt wurden. Die Herstellung eines Mikrofräasers dauert ungefähr von 2 bis 3 Stunde und hängt von der Anzahl der Flächen und dem Werkstoff des Werkzeuges ab. Ein Werkzeug mit mehreren Flächen braucht weniger Zeit, weil weniger Material entfernt wird. [Adam00]

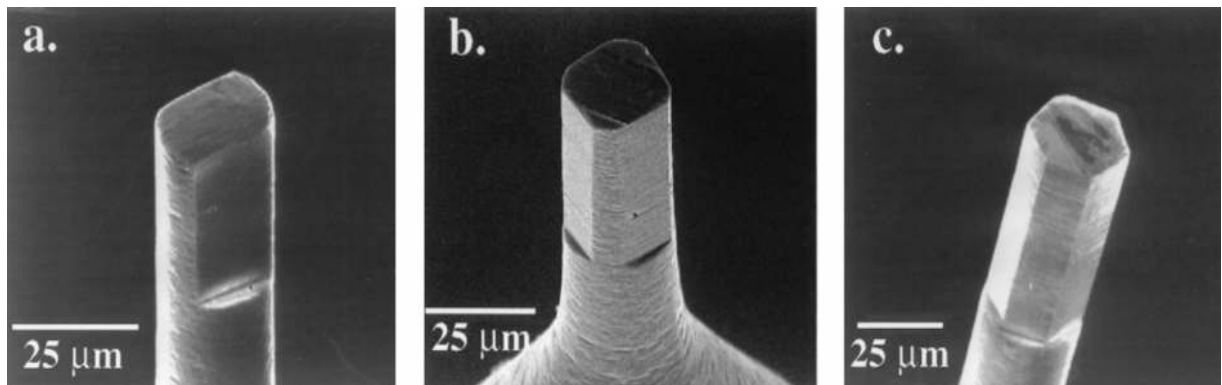


Abbildung 6, Mikrofräser mit 2, 4 und 6 Flächen [Adam00]

Die oben gezeigten Mikrowerkzeuge ermöglichen erfolgreich Gräben bei niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten in Werkstoffe wie PMMA, 6061-T4 Aluminium, Messing und 4340 Stahl zu erzeugen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Grabenbreiten $2\ \mu\text{m}$ (oder 8.3 %) größer als der Durchmesser des Mikrowerkzeuges ($24\ \mu\text{m}$) waren, während die Rauheit der Gräben zwischen 100 und 200 nm schwankte. Zusätzlich wurde es geschätzt, dass die Rate der Materialentfernung für eine Spindel aus Wolframkarbid C2 etwa $0.76\ \mu\text{m}^3/\text{sec}$ war. [Adam00]

Abschließend, Fokussierte Ionenstrahlen haben die folgenden Vorteile:

- es geht um ein berührungsloses Abtragverfahren,
- haben außergewöhnlich hohe Auflösung,
- können mit hoher Genauigkeit geringe Mengen Material entfernen
- jedes Material kann bearbeitet werden

Die Nachteile sind:

- unkonventionelle Geräte wie Unterdruckkammern müssen benutzt werden,
- die Materialentfernungsraten sind sehr niedrig.

3.1.3 Schleifen

Schleifen ist ein Verfahren, bei dem Oberflächenmaterial von einem Werkstück durch die Schleifwirkung einer rotierenden Scheibe aus Schleifkörnern entfernt wird. Es wird bei vielen Fertigungsprozessen verwendet, um eine feine Oberflächenbeschaffenheit auf einem Objekt zu erzeugen und die Größe eines Objekts innerhalb sehr enger Toleranzen zu fertigen. Es ist in der Regel besser geeignet für die Bearbeitung sehr harter Materialien im Vergleich zur Bearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide. Außerdem war es bis vor wenigen Jahrzehnten die einzige praktische Methode, die solche Materialien bearbeiten konnte.

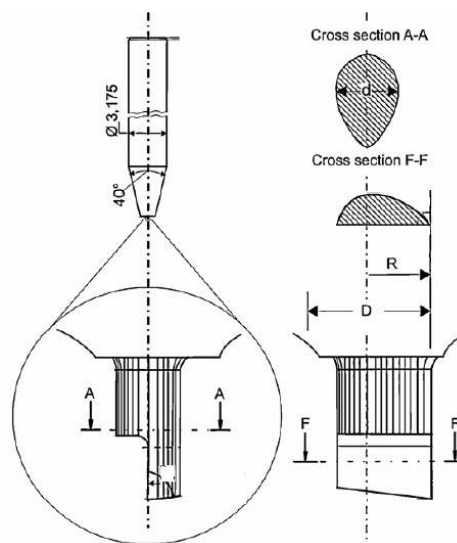


Abbildung 7, geometrische Eigenschaften eines Mikrofräsers [Auri12]

In [Auri12] haben Jan C. Aurich und sein Team ein geometrisch optimiertes Werkzeugdesign entwickelt und durch Schleifen hergestellt. Die wesentlichen geometrischen Eigenschaften des Mikrofräsers sind auf der Abbildung 7 zu sehen.

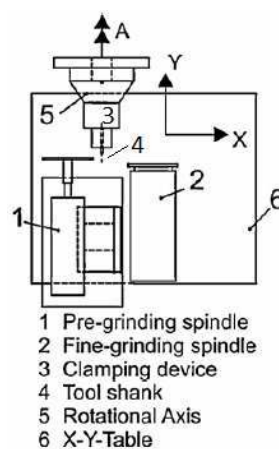


Abbildung 8, Entwurf einer 3-Achs-Desktop-Schleifmaschine [Auri12]

Die allgemeine Idee ist es, einschneidig Fräser aus Wolframkarbid zu benutzen. Darüber hinaus ist dieses Werkzeugdesign geeignet, weil es die technischen Daten bei sehr kleinen Durchmessern erfüllen kann und gleichzeitig kann es eine große Vielzahl von Materialien bearbeiten. Auf diese Weise ist auch ein Steigungswinkel ermöglicht. Die Herstellung der Mikrofräser wird auf einer 3-Achs-Desktop-Schleifmaschine durchgeführt. Abbildung 8 zeigt eine Zeichnung der Maschine mit zwei Schleifspindeln, die auf dem horizontalen X-Y Tisch befestigt sind. Der X-Y Tisch besitzt eine Auflösung von $0.1 \mu\text{m}$ und eine Wiederholgenauigkeit von $1 \mu\text{m}$, während der Rundlauf der Werkzeugaufnahme niedriger als $0.65 \mu\text{m}$ ist. Der Herstellungsprozess der Mikrofräser besteht aus drei Hauptteilen (Abbildung 9). [Auri12]

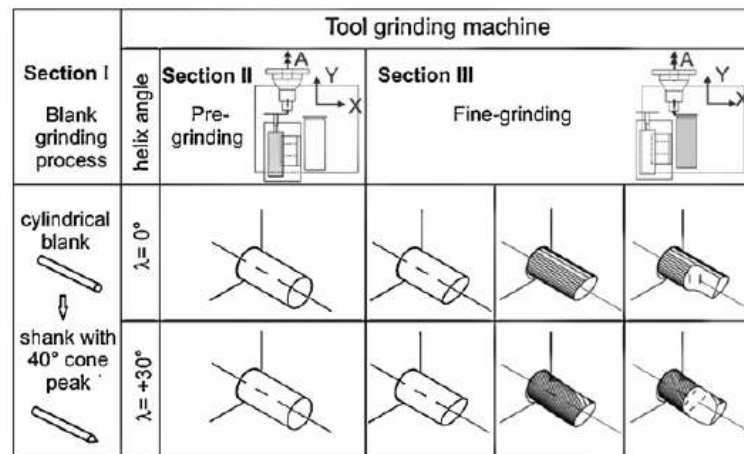


Abbildung 9, Herstellungsprozess der Mikrofräser durch Schleifen [Auri12]

Das erste Teil wird auf einer separaten Maschine, während die Schritte zwei und drei auf der Desktop-Schleifmaschine durchgeführt werden. Im ersten Schritt wird eine Spitze mit einem Kegelwinkel von 40° auf den zylindrischen Rohling geschliffen. Im zweiten Schritt ist der Schaft des Werkzeuges auf der A-Achse der Schleifmaschine befestigt und das Vorschleifen des Werkzeuges ist durchgeführt. Eine Diamantscheibe mit hoher Entfernungsrates wird verwendet, um einen Zylinder zu fertigen. Im dritten und letzten Schritt findet das Feinschleifen statt, wo die Verwendung einer diamantscheibe mit einer Korngröße von $1 \mu\text{m}$ auf einer luftgelagerte Spindel ist notwendig. Dieser Prozess ist von großer Bedeutung für eine gute Oberflächenqualität und hohe Präzision. Auf dem nächsten Bild ist ein Mikrofräser mit einem Durchmesser von $48 \mu\text{m}$ abgebildet. Der Winkel kann negativ, null oder positiv sein.

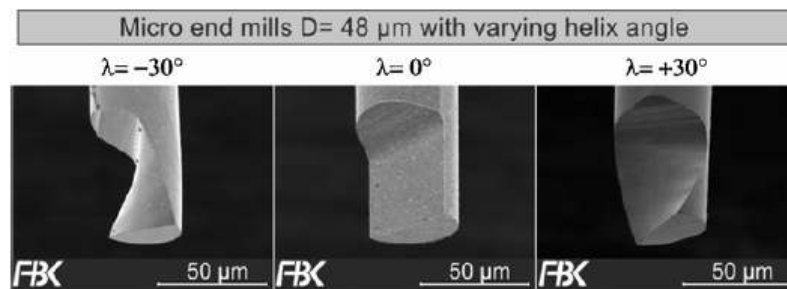


Abbildung 10, Mikrofräser mit drei verschiedenen Steigungswinkeln [Auri12]

Bei diesem Herstellungsverfahren können Durchmesser von 10 µm und ein Schneidkantenradius kleiner als 0,1 µm erreicht werden, während die gesamte Bearbeitungszeit für ein solches Fräswerkzeug weniger als 10 Minuten ist. Es geht folglich um einen sehr effizienten Prozess. Der kleine Schneidkantenradius und die spezifische Geometrie des Werkzeuges führen zu niedrigen Schnittkräften und guter Spanbildung. Schließlich kann die Kinematik des Prozesses Mikrofräser mit kundenspezifischer Geometrie ermöglichen, wie zum Beispiel Schwalbenschwanz- oder Kugelfräser. [Auri12]

3.2 Elemente der Werkzeugmaschinen

3.2.1 Führungen und Lagerungen

In den Werkzeugmaschinen wird eine Linearbewegung entweder des Werkzeug oder des Werkstückes durch die Führungen gewährleistet. Grundsätzlich gibt es vier Arten von Führungen: Gleitführungen, wälzgelagerte Führungen, magnetische Führungen und Festkörpergelenksführungen. [Uria09, Alti11, Venk07]

3.2.1.1 Gleitführungen

Gleitführungen verfügen über eine gute Dämpfung, Festigkeit gegen Stoßbelastungen und hohe Tragfähigkeit (bis zu 140 MPa). Sie werden vor allem in Geschwindigkeiten unter 0,5 m/s eingesetzt [Alti11]. Die Gleitführungen werden in die folgenden Kategorien unterteilt [Venk07]:

Hydrodynamisch

In den hydrodynamischen Gleitführungen werden die Oberflächen vollständig von dem Schmierfilm getrennt. Die auf den beiden Oberflächen aufgebrachte Last wird vollständig von dem Schmierfilmdruck unterstützt. Der Druck wird durch die relative Bewegung der Oberflächen erzeugt. Oberflächenverschleiß tritt nicht auf und

Reibungsverluste entstehen nur innerhalb des Schmierfilms. Typischerweise beträgt die minimale Schmierfilmdicke zwischen 0,008 mm und 0,02 mm, während die typischen Werte des Reibungskoeffizienten zwischen 0,005 und 0,001 liegen. [Venk07]

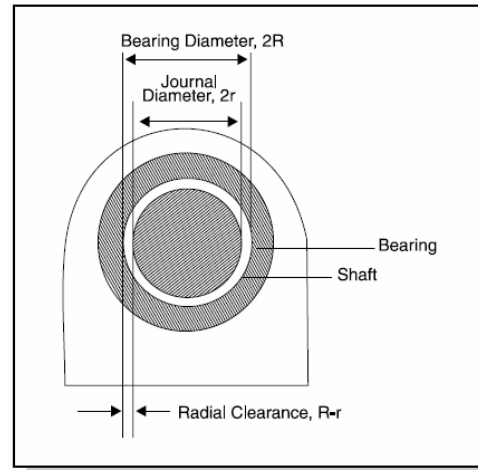


Abbildung 11, hydrodynamische Führung [Venk07]

Hydrostatisch

Die Gleitflächen der Komponenten werden durch Zellen mit Öl unter Druck voneinander getrennt, daher werden Stick-Slip-Effekt und Haftreibung in hydrostatischen Führungen vermieden. Der Druckunterschied zwischen dem Hohlraum und dem atmosphärischen Druck, der auf der Außenseite wirkt, wird Zellendruck genannt. Die hydrostatischen Führungen werden mit mehreren Zellen ausgelegt, so dass Momente und unsymmetrische Kräfte unterstützt werden können. Jede Zelle wird bei verschiedenem Druck geführt, damit Kräfte in unterschiedlichen Betriebsbedingungen widerstanden werden. In der Regel ist eine einzige Pumpe mit verschiedenen Druckbegrenzern verwendet, so dass jede Zelle mit entsprechendem Druck versorgt wird. [Alti11]

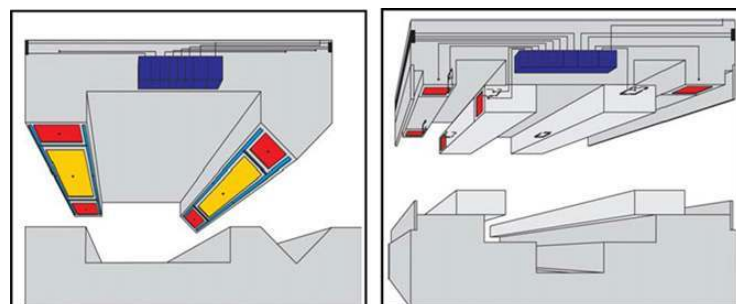


Abbildung 12, hydrostatische Führung [Alti11]

Aerodynamisch

Das aerodynamische Lager, die manchmal als Luftlager bekannt ist, funktioniert abhängig von der jeweiligen Relativbewegung zwischen den Lagerflächen. Diese Bewegung ist sehr ähnlich wie im Aquaplaning auf einer Wasserpfütze in dem Fall eines sich schnell bewegenden Fahrzeuges. Mit einer geringeren Geschwindigkeit hingegen schneidet der Reifen das Wasser auf der Straße durch. In ähnlicher Weise benötigt das aerodynamische Lager eine relative Bewegung zwischen den Oberflächen. Wenn es keine Bewegung gibt, oder wenn die Bewegung nicht schnell genug ist, um einen Luftfilm zu erzeugen, kommen die Lagerflächen in Kontakt. Diese Art der Lagerung ist relativ einfach, weil sie unabhängig von einer externen Druckquelle oder einem Mechanismus ist. Aufgrund der Tatsache, dass die Oberflächen des Lagers einen sehr hohen Standard an Genauigkeit und eine reduzierte Belastung erfordern, ist ihre Anwendung begrenzt. Es ist auch nicht geeignet für Anwendungen, bei denen häufigen Starts und Stopps oder Richtungsänderungen erforderlich sind. Das aerodynamische Lagersystem ist jedoch einfacher und billiger zu betreiben, verglichen mit den aerostatischen Systemen. Typische Beispiele für diese Art der Lagerung sind der Schreib-Lesekopf, der über eine sich drehende Scheibe fliegt Kurbelwellenzapfen und Axiallager für elektrische Generatoren. [Uria09]

Aerostatisch

Im Gegensatz zu aerodynamischen Lagern, können aerostatisches Lager Lasten bei Stillstand tragen. Luftlager bieten eine Lösung für viele High-Tech-Anwendungen, wo hohe Leistung und hohe Genauigkeit erforderlich sind. Aerostatisches Lager benötigt eine externe Druckluftquelle. Die Druckluft wird zwischen den Lagerflächen durch Präzisionsbohrungen oder Rillen eingeführt und leitet durch die Kanten der Lager ab (Abbildung 13). Wenn die richtige Form ausgewählt wird, kann eine sehr hohe Steifigkeit erreicht werden. Die aerostatischen Lager können hohe Lasten tragen, aber sie erfordern eine kontinuierliche Quelle von Druckluft. Aufgrund der Tatsache, dass die Luft eine sehr niedrige Viskosität hat, müssen die Lagerspalte sehr dünn sein und zwar in der Größenordnung von 1-10 μm . Da das Objekt auf einer dünnen Luftschicht schwimmt, ist die Reibung extrem niedrig und sogar Null im Stillstand. Weil Luftlager eine Druckluftquelle benötigen, kann ein Luftspalt sogar in

Abwesenheit einer Relativbewegung zwischen den Lagerflächen gehalten werden.

[Uria09]

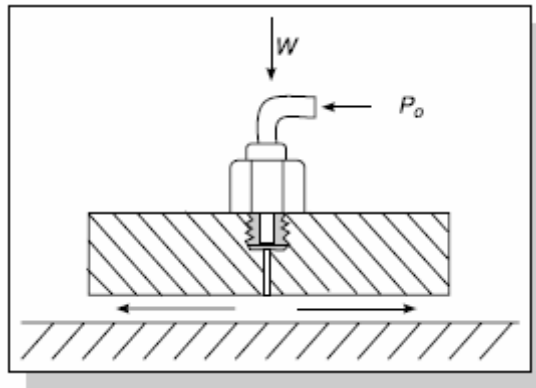


Abbildung 13, aerostatische Führung [Uria09]

3.2.1.2 Wälzgelagerte Führungen

Führungen mit und ohne Wälzkörperrückführung (siehe Abbildung 14) sind am häufigsten in den heutigen Anwendungen verwendet. Die Führungen mit Wälzkörperrückführung sind am meisten benutzt, wenn große Verschiebewege benötigt werden. Die Wälzführungen ohne Wälzkörperrückführung hingegen sind in ihrem Verfahrweg sehr begrenzt. Die Wälzkörper können Stahlkugeln, Rollen oder Nadeln sein. Ihr Käfig liegt zwischen den stationären und beweglichen Teilen der Führung und ist vorgespannt. Sie weisen geringe Reibung, hohe Belastbarkeit und Steifigkeit auf, haben aber auch geringe Dämpfung und große Bauhöhe. [Alti11]

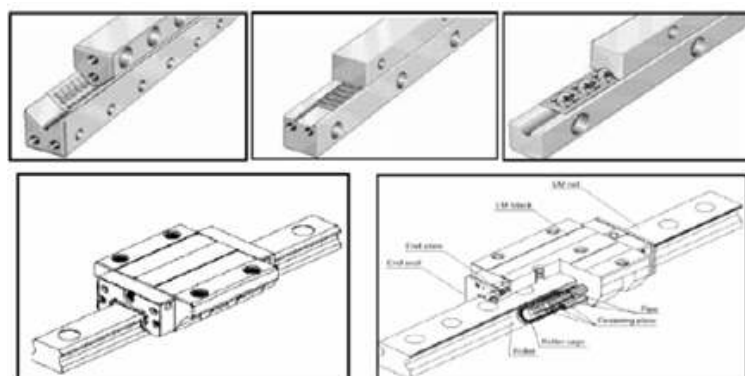


Abbildung 14, verschiedene wälzgelagerte Führungen [Alti11]

3.2.1.3 *Magnetische Führungen*



Abbildung 15, magnetisch schwebender Tisch [Alti11]

Magnetische Führungen werden vor allem in Anwendungen eingesetzt, in denen die genaue Positionierung eine sehr wichtige Rolle spielt. Sie verfügen über einen reibungsfreien Betrieb ohne Verschleiß und Schmierung. In Kombination mit Linearmotoren wird ein mechanischer Kontakt zwischen den beweglichen und feststehenden Teilen vermieden. Ihre Hauptnachteile sind die fehlende Dämpfung und die Komplexität des Steuersystems, das Bewegung bis zu fünf Freiheitsgraden von Bewegungen steuern muss. [Alti11]

Die Abbildung 15 zeigt einen magnetisch schwebenden Tisch, wobei der bewegliche Teil des Tisches frei von jedem Kontakt und Leitungen ist. Wenn solche Systeme mechanisch gut entworfen sind, können das dynamische Verhalten und die Gesamtgenauigkeit erhöht werden.

3.2.1.4 *Festkörpergelenksführungen*

Festkörpergelenksführungen basieren auf den elastischen Eigenschaften von Materialien. Ihre Hauptvorteile als Führungslösungen sind reibungsfreie und spielfreie Bewegungen und kein Stick-Slip-Effekt. Die wichtigsten Einschränkungen sind die geringe Belastbarkeit und der geringe Verfahrweg. Mit einem angemessenen Design sind sie aber in der Lage, einige Millimeter Verfahrweg zu schaffen. [Uria09]

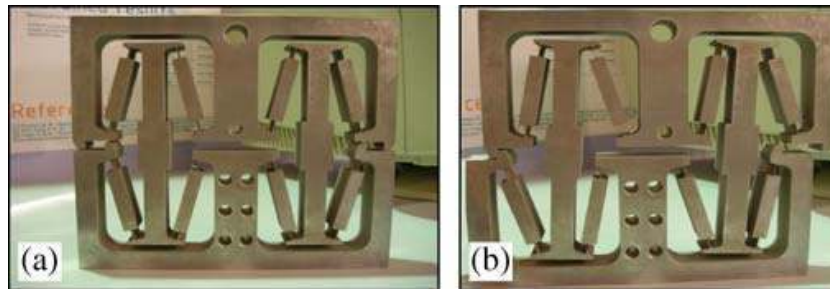


Abbildung 16, Festkörpergelenksführung. (a) Ursprüngliche Position, (b) Deformiert [Uria09]

Die Abbildung 16 zeigt eine Festkörpergelenksführung für einen Verfahrweg von 20 mm. Sie verfügt über eine allgemeine Größe von 160 × 180 mm und eine parasitäre Bewegung senkrecht zu der Hauptrichtung von 0,1 µm, die aber höchst Wiederholbar ist, also leicht sie zu kompensieren.

3.2.2 Getriebe

Der Zweck des Getriebes ist es, die Bewegung des Antriebs auf das Werkstück oder auf das Werkzeug zu übertragen. In den herkömmlichen Maschinen ist in der Regel das Spindel-Mutter-System verwendet, seine verbesserte Form mit umlaufenden Kugeln aber ist auch bekannt. Für die Präzisions- und Ultrapräzisionsmaschinen sind der Reibungsantrieb und der Linearmotorantrieb besser geeignet. [Uria09, Alti11, Venk07]

3.2.2.1 Zahnstange-Ritzel-System

Die Zahnstangen-Ritzel-Getriebe sind am meisten für lange Verfahrwege empfohlen, weil bei der Zugabe von mehreren Zahnstangen sehr lange Verfahrwege realisiert werden können. Die resultierende Gesamtsteifigkeit des Zahnstangengetriebes ist immer unabhängig von der Länge des Verfahrweges. Die Kraftübertragung wird durch eine niedrige Drehzahl des Ritzels und hohes Drehmoment gekennzeichnet. Das Zahnstangen-Ritzel-System sollte einerseits mit hoher Torsionssteifigkeit gestaltet werden. Andererseits sollte es möglichst spielfrei sein. Eine spielfreie Vorschubübertragung in beiden Bewegungsrichtungen kann durch die Trennung des Ritzels erreicht werden. Die Vorspannung wird durch den Antrieb der beiden Ritzel mit zwei Motoren in entgegengesetzten Richtungen erreicht. Der Hauptmotor speist mit hohem Drehmoment das Hauptritzel, während der zweite weniger Drehmoment liefert, um das Spiel zu entfernen [Alti11]. Die Abbildung 17 zeigt die Drehmomentlinien in drei verschiedenen Varianten.

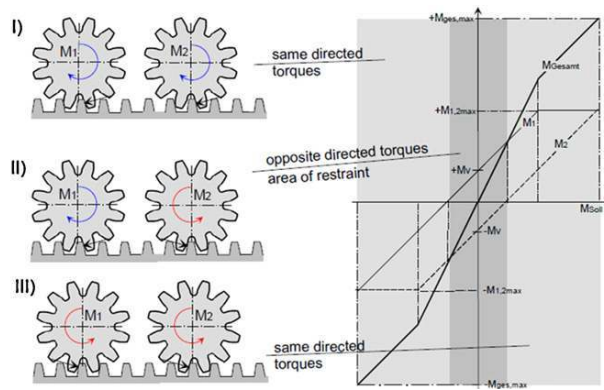


Abbildung 17, Zahnstange-Ritzel-System mit elektrischer Vorspannung [Alti11]

3.2.2.2 Kugelumlaufspindel

Die Kugelumlaufspindel ist ein Getriebe-System, das derzeit am häufigsten in Werkzeugmaschinen verwendet ist. Sie zeichnet sich durch hohe Effizienz aus (95-98%) und das hat zur Folge geringe Erwärmung und Verschleiß, hohe Lebensdauer und kein Stick-Slip-Effekt [Alti11]. Die Kugelumlaufspindel besteht aus einer Schraube und eine Mutter mit Kugelumlauf (Abbildung 18).

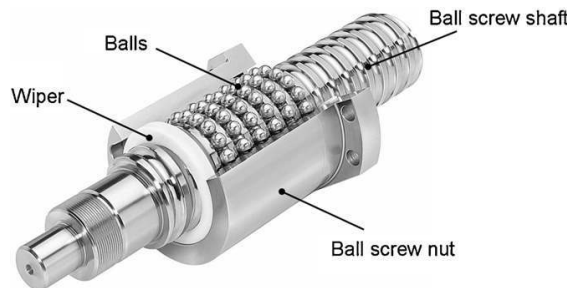


Abbildung 18, Kugelumlaufspindel [Alti11]

Die Mutter ist mit dem Tisch verbunden. Das Ende der Kugelumlaufspindel wird entweder direkt an einen Motor oder über Getriebe gekoppelt. Die Mutter ist entweder durch die Einstellung des Abstands (Abbildung 19links) oder durch überdimensionale Kugeln (Abbildung 19rechts) vorgespannt, damit ein Spiel vermieden wird.

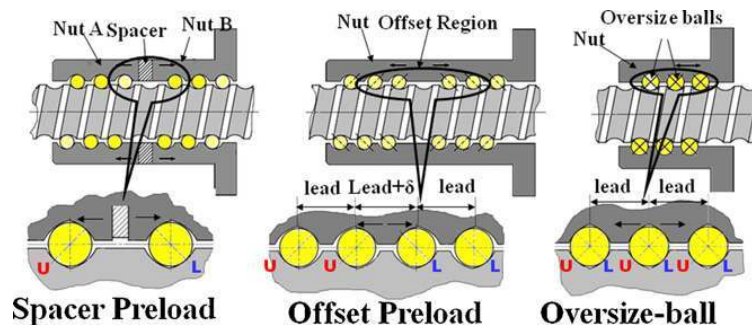


Abbildung 19, Schraubenmutter Mechanismen [Alti11]

Aufgrund der Tatsache, dass das Schleifen der Gewindesteigungen in gleichmäßigen Abständen ziemlich schwierig ist, werden die Teilungsfehler, sofern sie nicht kompensiert werden, als Positionsfehler übertragen. Die meisten Kugelumlaufspindeln können bis zu 100 m / min Geschwindigkeit und 2g Beschleunigung liefern. [Alti11]

Gründe, die zu einer signifikanten Erhöhung der Geschwindigkeit und Genauigkeit der Kugelumlaufspindel führen können, sind die Optimierung des Kugelumlaufspindel-Designs, die geeignete Beschichtung der Kugeln mit Zweck einer geringen Reibung und Verschleiß sowie die Vorspannungskontrolle der Mutterschraube. Die Abbildung 20 stellt die zwei Arten von Kugelrückführungen dar. Sie sind die interne und externe Rückführung.

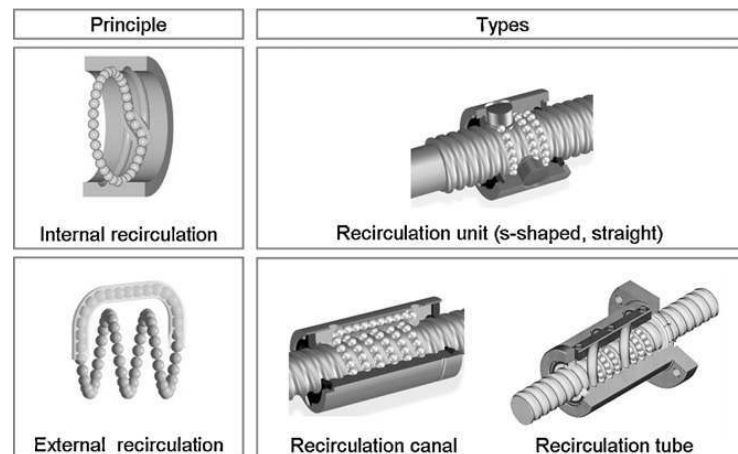


Abbildung 20, Kugelumlaufspindel-Systeme [Alti11]

3.2.2.3 Reibungsantrieb

Reibungsantriebe sind eine Alternative zu den Kugelumlaufspindeln. Sie schaffen eine translatorische Bewegung durch den Druck einer Stahlrolle gegen eine Stahlstange. Wenn sich die Rolle dreht, bewegt sich die Stange translatorisch. Die typische Arbeitsweise ist auf der Abbildung 21 gezeigt. [Venk07]

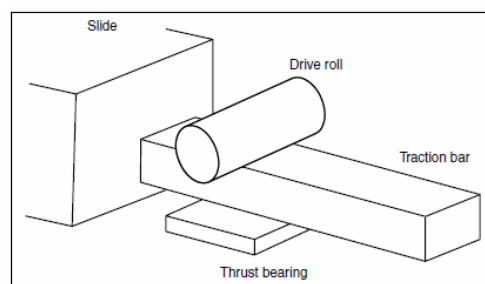


Abbildung 21, Reibungsantrieb [Venk07]

Diese Alternative dennoch weist wichtige Nachteile auf, nämlich geringe Dämpfung und geringe Belastbarkeit. Wenn man die Vorschubkraft erhöhen will, muss die Vorspannung zwischen der Stange und der Rolle erheblich gesteigert werden. Das kann aber zu Verformungen zwischen den Elemente führen. [Venk07]

3.2.2.4 Lineardirektantrieb

Ein Linearmotor kann als ein Drehmotor betrachtet werden, der zu seiner Achse geschnitten, ausgerollt und in der Länge gestreckt ist.

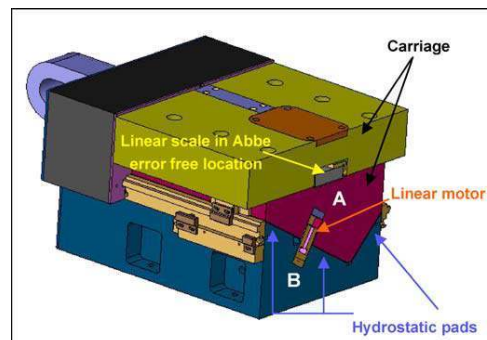


Abbildung 22, Linearmotor [Uria09]

Die Anwendung von Linearmotoren hat viele Vorteile [Uria09]:

- Die Genauigkeit, die Auflösung und die Wiederholgenauigkeit des sich bewegenden Systems werden durch das Messsystem bestimmt.
- Hinsichtlich der Steifigkeit nach Bewegungsrichtung weisen die Linearmotoren den Vorteil auf, dass sie keine Flexibilität in das System einführen, weil das Getriebe direkt ist und es keine zusätzlichen Bauteile gibt. Im Fall der Drehbewegung hingegen sind Übertragungselemente erforderlich, damit sie die Drehbewegung in eine lineare Bewegung umwandeln.
- Ohne mechanische Getriebekomponenten gibt es kein Spiel und auch kein Verschleiß.
- Für hochgenaue Anwendungen ist ein eisenloser Linearmotor die beste Option. Solche Linearmotoren sind für Präzisionsanwendungen geeignet,

aufgrund der Tatsache, dass sie keine Anziehungskräfte und keine Verzahnung aufweisen.

4 Beschreibung der neu entwickelten Maschine

Der Entwurf der entwickelten Maschine ist auf Abbildung 23 zu sehen. Die rot markierten Pfeile symbolisieren die linearen und rotatorischen Bewegungen der verschiedenen Elemente. Der Konstruktion umfasst insgesamt fünf Linear- und zwei Drehachsen, die verantwortlich für die hochpräzisen Bewegungen sind.

Die Linearführung A trägt und führt die Hauptspindel entlang der Maschine, die in zwei Räume geteilt ist. Im ersten Raum (rechts) findet die Erzeugung des Mikrofräsers statt, während im zweiten Raum (links) die Bearbeitung des Werkstücks erfolgt. Die Führung trägt die Spindel zwischen den beiden Räumen. Hier geht es um die längere Führung und normalerweise die teuerste, glücklicherweise muss sie aber nicht über große Genauigkeit verfügen. Deswegen hat sie Profilschienenführung und eine Kugelumlaufspindel (Genauigkeit $\pm 12\mu\text{m}$). Die Übertragung der Bewegung übernimmt ein Schrittmotor.

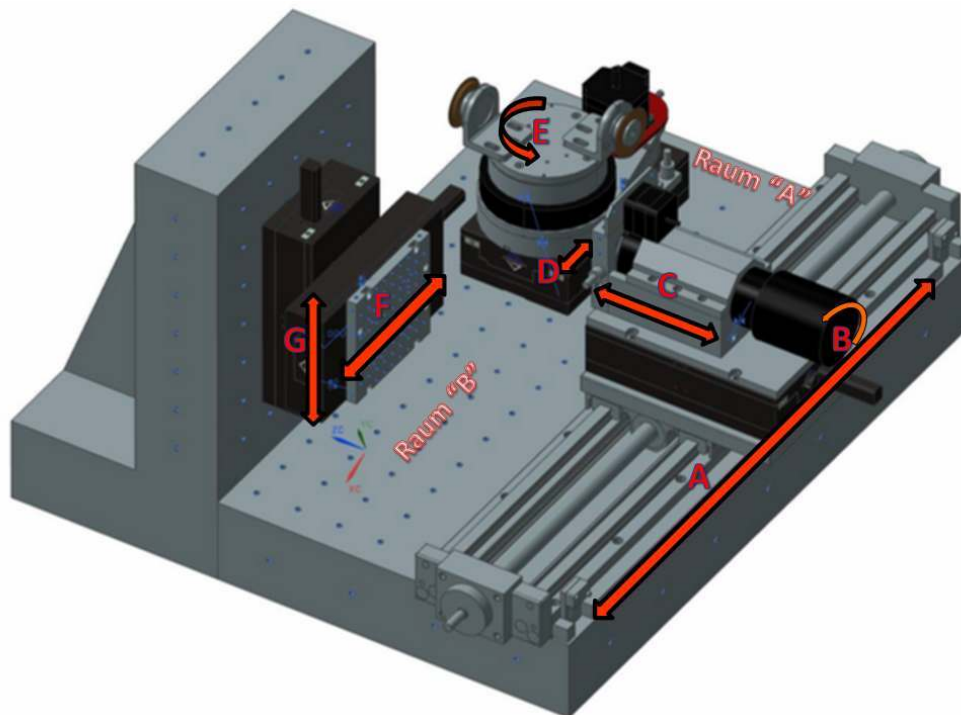


Abbildung 23, Entwurf der entwickelten Maschine

Der Antrieb der rotatorischen Achse B (auch Drehachse des Mikrofräsers) führt zwei Funktionen aus. Einerseits muss er eine genaue Drehbewegung während der Herstellungsphase des Mikrofräsers gewährleisten, andererseits muss er fähig sein, in der Verwendungsphase eine große Drehgeschwindigkeit auf die Spindel zu übertragen.

Die Linearachse C bringt das Mikrowerkzeug in Kontakt entweder mit den Schleifscheiben oder mit dem zu bearbeitenden Werkstück. Auf jeden Fall muss diese Bewegung genau sein und die Verwendung eines entsprechenden Lineartisches ist erforderlich (Genauigkeit $\pm 250\text{nm}$). Solche Lineartische haben oft eine Kreuzrollenführung und einen Linearmotor, die über zufrieden stellende Eigenschaften verfügen. Die Achse D und E dienen der Position und der Ausrichtung der Schleifscheibe. Weil sie Ziel der Arbeit sind, wird ihr Zweck in den folgenden Kapiteln erläutert.

Wie vorher erwähnt, findet im Raum B die Verwendung des hergestellten Mikrofräsers und die Bearbeitung des Werkstückes statt. Dafür sind ein senkrechter und ein waagerechter Lineartisch notwendig. Auf dem Lineartisch F wird das Stück befestigt, das sich auf einer Ebene mit Genauigkeit $\pm 250\text{nm}$ bewegt. Die Mikrobearbeitung eines Stückes an einer Drei-Achsen-Maschine ist jetzt möglich.

5 Bauteile der Konstruktion

In diesem Kapitel wird jedes einzelne verwendete in der Konstruktion Bauteil dargestellt. Einige von Ihnen stehen schon zur Verfügung bei FBK, einige müssen vom Markt ausgewählt und eingekauft werden und andere werden entwickelt, gezeichnet und hergestellt. Auf dem folgenden Bild werden der Zusammenbau sowie die Benennung der Teile dargestellt.

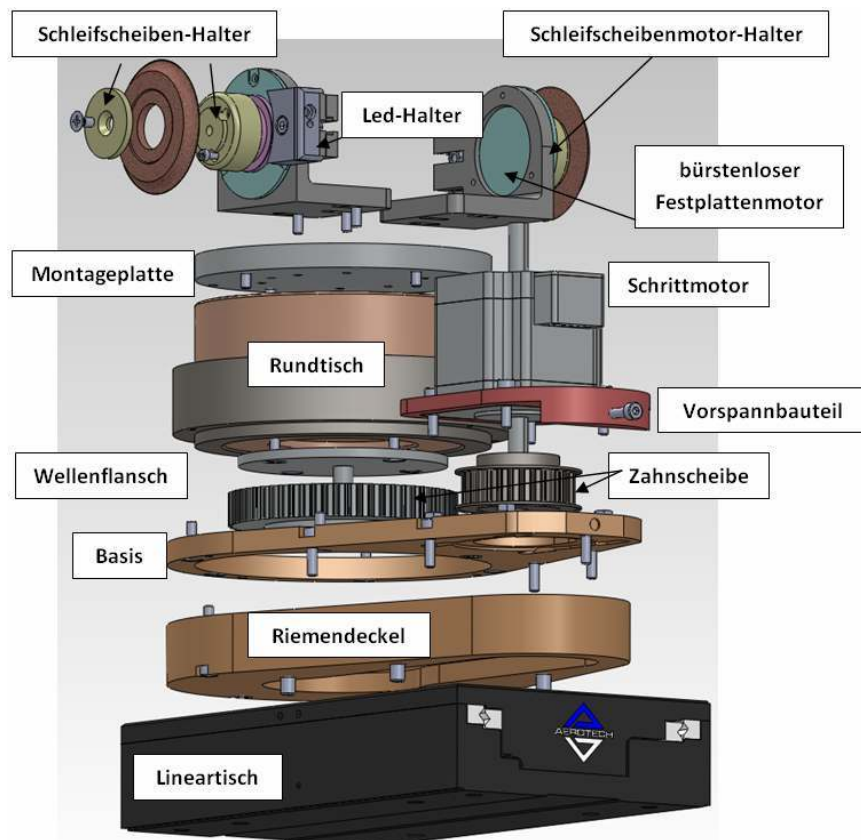


Abbildung 24, Benennung der Teile

5.1 Rundtisch

Ganz allgemein, ein Rundtisch (oder Drehtisch) ist ein Teil einer Werkzeugmaschine, auf dem Werkstücke zur Bearbeitung aufgespannt werden. Er besteht aus einer soliden Basis, die für das Zusammenbauen mit anderen Teilen verwendet wird und aus einem drehenden Teil. Hochpräzise Anwendungen benötigen oft Hydrostatische Lagerungen (als Tragmedium können Gase oder Flüssigkeiten benutzt werden).

Bei dem Lehrstuhl FBK befindet sich bereits ein ultrapräziser luftgelagerter Rundtisch der Firma LT Ultra (siehe Abbildung 25). Die wesentlicheren Eigenschaften des Tisches sind: nahezu reibungsfreier Betrieb, kein Stick-slip Effekt, Rund/Planlaufgenauigkeit < 50 nm und hohe Steifigkeit.



Abbildung 25, Rundtisch der Firma LT Ultra

Die 3D-Zeichnungen des Tisches waren nicht zur Verfügung. Das heißt, dass sie anfertigen werden mussten. Das verwendete CAD-Programm war SolidWorks 2011 des Softwareunternehmens „Dassault Systèmes SolidWorks Corp.“. Es folgen die technische 3D-Zeichnungen des Rundtisches, die später für die Kopplung mit den anderen Teilen verwendet werden.

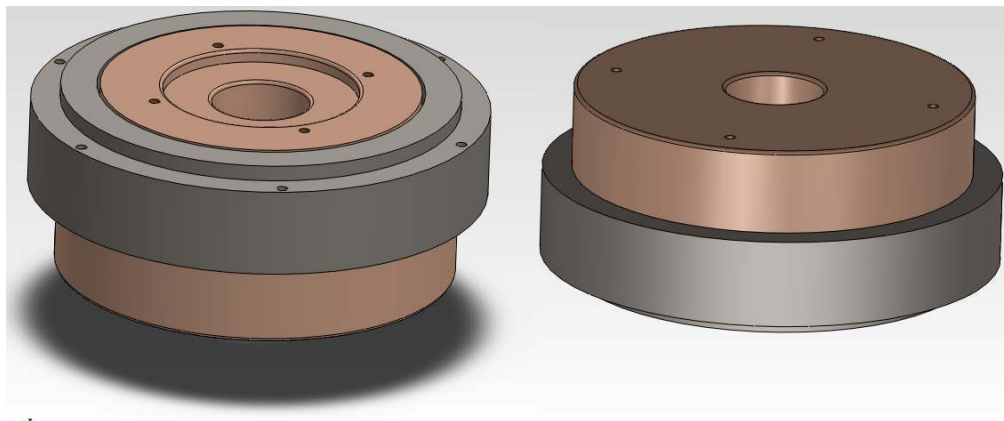


Abbildung 26, 3D-Zeichnungen des Rundtisches

5.2 Lineartisch

Für die lineare Bewegung des Rundtisches sind zwei Möglichkeiten untersucht worden. Die Erste war die Planung und Konstruktion eines selbstgebauten Tisches. Voraussetzung dafür wäre die geeignete Auswahl einer Linearführung, eines Antriebs und eines Messsystems. Wegen der großen Komplexität, wurde diese Lösung abgelehnt. Die zweite Möglichkeit war die Auswahl eines Fertigproduktes aus dem Markt, das die technische Spezifikationen erfüllt. Auf dem Markt gibt es eine große Vielfalt von Lineartische. Große Genauigkeit und Wiederholgenauigkeit bieten

die Luft- und Hydrostatische Tische, die aber außer teuer sind. Es folgen die Rolltische. Sie weisen zwar ein bisschen schlechtere Eigenschaften auf, werden sie aber auf viel günstigere Preise angeboten. Besonders die Kreuzrollentische zeichnen sich durch den außergewöhnlichen Leichtlauf, die hohe Steifigkeit und die hervorragende Präzision aus. Die technische Blätter verschiedener Unternehmen (wie z.B. SCHNEEBERGER Linear Technology, OWIS GmbH, ALIO GmbH, Aerotech Inc.) wurden ausführlich untersucht und es wurde herausgefunden, dass der Lineartisch Aerotech ANT130-110-L-PLUS (Abbildung 28) am besten die Bedingungen des Projektes erfüllt. Die technischen Eigenschaften sind auf der Abbildung 27 zu sehen.

Model	ANT130-110-L-PLUS	
Travel	110 mm	
Accuracy ⁽¹⁾	±300 nm	
Resolution	1 nm	
Repeatability (Bidirectional) ⁽¹⁾	±75 nm	
Repeatability (Unidirectional)	±25 nm	
Straightness ⁽¹⁾	±1.0 µm	
Flatness ⁽¹⁾	±1.0 µm	
Pitch	10 arc sec	
Roll	10 arc sec	
Yaw	5 arc sec	
Maximum Speed	350 mm/s	
Maximum Acceleration	1 g (No Load)	
In-Position Stability ⁽²⁾	<1 nm	
Maximum Force (Continuous)	23 N	
Load Capacity ⁽³⁾	Horizontal	12.0 kg
	Side	10 kg
Moving Mass	1.9 kg	
Stage Mass	3.3 kg	

1. Certified with each stage.
2. In-Position Jitter listing is 3 sigma value.
3. Axis orientation for on-axis loading is listed.

Abbildung 27, technische Eigenschaften des Lineartisches [Aero14]

Der Lineartisch besitzt unter anderen einen bürstenlosen Linearservomotor und ein berührungsloser Lineargeber als Messsystem. Er wird über den NSTEP Controller (Abbildung 28) und der "Automation 3200" Software gesteuert.



Abbildung 28, Aerotech ANT130-110-L

Die 3D-Zeichnungen stehen auf der Webseite des Herstellerunternehmens zur Verfügung und werden auf der Abbildung 29 dargestellt.

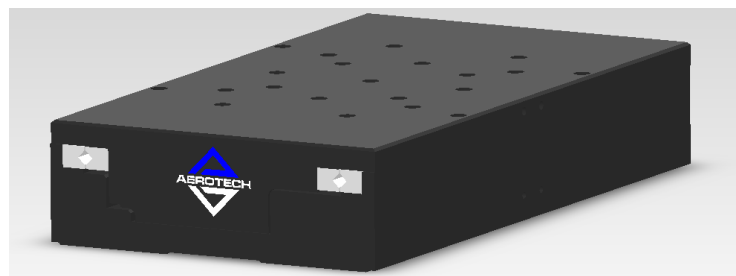


Abbildung 29, 3D-Zeichnung des Lineartisches

5.3 Übertragung des Drehmoments

Die Übertragung des Drehmoments vom Schrittmotor zu dem Drehtisch konnte durch zwei Lösungen erreicht werden. Die Erste war der Direktantrieb, die zwar ein einfachere Verbindung sein würde, wies sie aber einige Nachteile auf, wie z.B. die große Bauhöhe und die schlechtere Auflösung des Schrittmotors wegen der eins zu eins Übersetzung. Auf der Abbildung 30 wird der Direktantrieb dargestellt und es ist zu erkennen, dass die gesamte Höhe der Baugruppe zu groß ist.

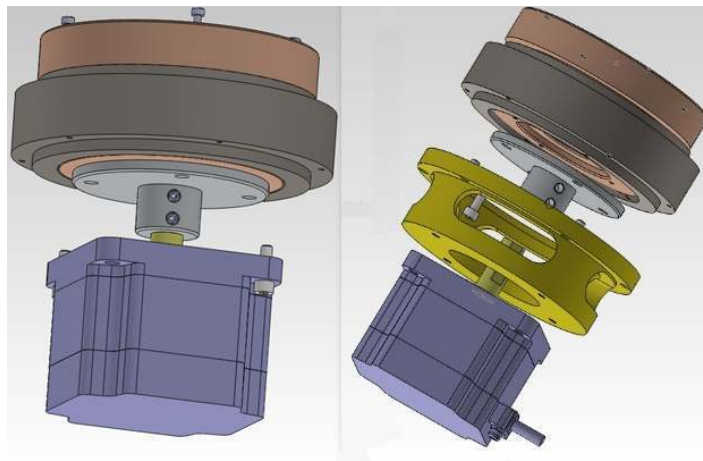


Abbildung 30, erste Variante : Direktantrieb

Damit mehr Platz gewonnen wird und ein Übersetzungsverhältnis 1 zu 2 oder mehr erreicht, ist für ein Zahnriemengetriebe entschieden. Diese Lösung bietet die folgenden Vorteile:

- Synchroner und schlupffreier Bewegungsübertragung
- Wartungsfrei (kein Nachschmieren, kein Nachspannen erforderlich)
- Massearm
- Hohe Riemengeschwindigkeiten möglich (bis 40 m/s)
- Wirkungsgrad bis 99% bei Nennlast

In den folgenden Beiträgen werden die Berechnungsschritte der Getriebe dargestellt.

5.3.1 Vorauswahl des Zahnriemenprofils

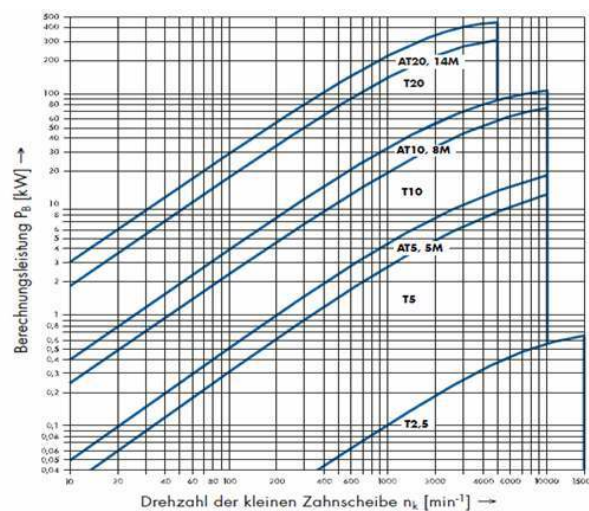


Abbildung 31, Auswahl des Zahnriemenprofils [Opti13]

Um das richtige Profil vorauszuwählen, können wir die oben gezeigte Grafik benutzen. In unserem Fall liegt die Berechnungsleistung unter 50 W und die Höchstdrehzahl um etwa 120 Upm. Obwohl das Profil "T" auch geeignet sein konnte,

wurde das verbesserte Profil "AT" mit Zahnteilung $p = 5\text{mm}$ (siehe Bild unten) ausgewählt. Dieses Profil (laut Firma Gates [Gate11]) wurde im Vergleich zum Profil "T" entwickelt, um höhere Tragfähigkeit und gleichzeitig geringes Spiel zu ermöglichen. Der stärkere und steife Zahn macht dieses Profil ideal für lineare Positionierung und Bewegungssteuerung.

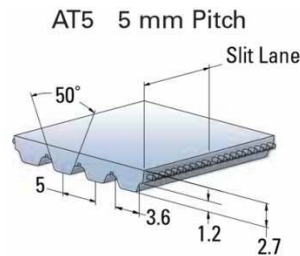


Abbildung 32, Zahnriemenprofil AT5 [Gate11]

5.3.2 Übertragungsgenauigkeit, Verdrehsteifigkeit

Die unten genannten Faktoren können die Genauigkeit des Getriebes beeinflussen. Deswegen sollten sie auf Rucksicht nehmen. [Raim09]

- Zugstrangverhalten und Seilzugsteifigkeit

Die Größen zulässige Zugkraft F_{zul} und Spezifische Federsteifigkeit c_{Bspez} sollen so groß wie möglich sein.

- Größe der Zahnscheibe

Die Durchmesser der Scheiben beeinflusst im Quadrat die Verdrehsteifigkeit. Je größer die Durchmesser, desto besser die Verdrehsteifigkeit.

- Riemenbreite

Die Vergrößerung der Riemenbreite verbessert die Verdrehsteifigkeit und Winkelgenauigkeit.

- Vorspannkraft

Die empfohlene und richtig eingestellte Vorspannkraft ist für die winkeltreue Übertragung von essentieller Bedeutung. Jede weitere Zunahme der Vorspannkraft geht mit einer Vergrößerung der Riemenzahnsteifigkeit einher.

5.3.3 Höchstdrehzahl und notwendiges Beschleunigungsdrehmoment

Das Trägheitsmoment des rotierenden Teiles ist laut 3D-Modell $J = 0,009024\text{Kg} \cdot \text{m}^2$

Bestimmung der erwünschten Beschleunigung :

z.B. Drehwinkel $\rho = 180^\circ$, Beschleunigungszeit $t_b = 0,5 \text{ sec}$,

$$\text{Winkelbeschleunigung } a = \frac{2\pi \cdot \rho}{180 \cdot t_b^2} = \frac{2\pi \cdot 180}{180 \cdot 0,5^2} = 25,13 \frac{\text{rad}}{\text{sec}^2}$$

$$\text{Höchstzahl } n_2 = \frac{a \cdot t_b \cdot 60}{2\pi} = \frac{25,13 \cdot 0,5 \cdot 60}{2\pi} = 120 \text{ Upm}$$

$$\text{Beschleunigungsmoment } M_b = \frac{\Delta n \cdot J}{9,55 \cdot t_b} = \frac{120 \cdot 0,009024}{9,55 \cdot 0,5} = 0,227 \text{ N} \cdot \text{m}$$

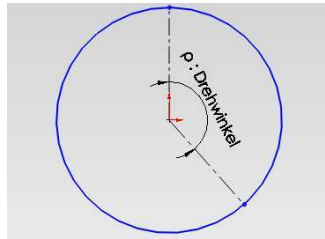


Abbildung 33, erwünschter Drehwinkel

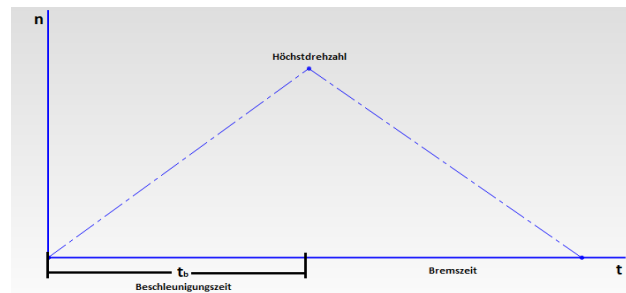


Abbildung 34, erwünschte Beschleunigungszeit

5.3.4 Bestimmung der Anzahl der Zähne nach Continental Katalog

Ausgewählte Übersetzung $i = 2$. (Die Durchmesser der Scheiben sollen so groß wie möglich sein)

Zähnezahl der kleinen Scheibe $z_1 = 30$, Max eingreifende Zähnezahl $z_{e1} = 13$

Zähnezahl der großen Scheibe $z_2 = 60$, Max eingreifende Zähnezahl $z_{e2} = 16$

$$\text{Wirkkreisdurchmesser } d_{w1} = \frac{p \cdot z_1}{\pi} = \frac{5 \cdot 30}{\pi} = 47,75 \text{ mm}, \quad d_{w2} = \frac{p \cdot z_2}{\pi} = \frac{5 \cdot 60}{\pi} = 95,49 \text{ mm}$$

5.3.5 Berechnung der Riemenbreite

Drehmoment der kleinen Scheibe $M_1 = M_b / i = 0,227 / 2 = 0,114 \text{ N} \cdot \text{m}$

→ $0,96 \text{ N} \cdot \text{m}$ (Oriental Motor Katalog)

$$b = \frac{100 \cdot M_1}{z_1 \cdot z_{e1} \cdot M_{spec}} = \frac{100 \cdot 1,30}{30 \cdot 13 \cdot 3,08} = 0,108 \text{ cm} = 1,08 \text{ mm}$$

Im Continental's Katalog stehen Riemenbreite ab 6 mm zur Verfügung. Zur Verbesserung des Dehnungsverhaltens wird eine Riemenbreite von 10 mm ausgewählt. Diese Breite kann ein Motor mit maximalem

$$M = \frac{b \cdot z_1 \cdot z_{e1} \cdot M_{spez}}{1000} = \frac{10 \cdot 30 \cdot 13 \cdot 3,08}{1000} \approx 12 N \cdot m \text{ Drehmoment unterstützen.}$$

M_{spez} ist im Herstellerkatalog zu finden (siehe unten). Die Umdrehungen pro Minute der kleinen Scheibe entstehen von der Formel $n_1 = i \cdot n_2 = 2 \cdot 120 = 240 Upm \rightarrow 300 Upm$

Tooth shear strength (specific belt tooth strength)			
R.p.m. n [min ⁻¹]	F _{Uspec} [N/cm]	M _{spec} [Nm/cm]	P _{spec} [W/cm]
0	44,13	3,51	0,00
20	43,63	3,48	0,07
40	43,13	3,44	0,14
60	42,63	3,40	0,21
80	42,25	3,36	0,28
100	41,88	3,33	0,35
200	40,00	3,19	0,67
300	38,63	3,08	0,96

Abbildung 35, Bestimmung der Werte von Mspez und Fspez [Cont12]

5.3.6 Berechnung der Riemenlänge

Achsabstand $C \approx 125..130mm$

Riemenlänge

$$L_b = \frac{\pi(d_{w1} + d_{w2})}{2} + 2C + \frac{(d_{w2} - d_{w1})^2}{4C} = \frac{\pi(47,75 + 95,49)}{2} + 2 \cdot 127 + \frac{(95,49 - 47,75)^2}{4 \cdot 127} \Rightarrow$$

$$L_b = 483,49mm \rightarrow 480mm$$

AT 5 GEN III		
Type / Length*	Number of teeth	
AT 5 / 450	90	
AT 5 / 455	91	
AT 5 / 480	96	
AT 5 / 490	98	
AT 5 / 500	100	

Abbildung 36, Riemenlänge Vorauswahl [Cont12]

Neuer Achsabstand

$$C = \frac{1}{4} \left[L_b - \frac{\pi(d_{w1} + d_{w2})}{2} + \sqrt{\left(L_b - \frac{\pi(d_{w1} + d_{w2})}{2} \right)^2 - 2(d_{w2} - d_{w1})^2} \right] \approx 125,22mm$$

5.3.7 Berechnung der Verdrehsteifigkeit und des Verdrehwinkels

Die Berechnung von Verdrehsteifigkeit (k) und Verdrehwinkel (φ) lässt sich anhand der Modellbetrachtung an einem Zweiwellenantrieb im quasi stationären Zustand derart veranschaulichen (siehe Bild unten), dass man sich die treibende Scheibe

eingespannt vorstellt, und an der Gegenscheibe wird ein Drehmoment aufgebracht. Unter diesen Bedingungen bildet sich aufgrund des elastischen Verhaltens in den Riementrumen sowie durch Zahn deformierung in den Umschlingungsbögen von kleiner und großer Zahnscheibe ein Verdrehwinkel (φ) aus. [Raim09]

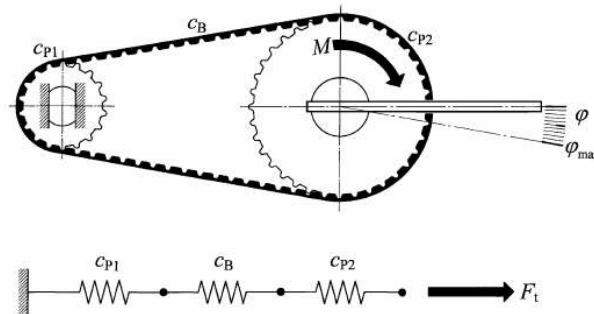


Abbildung 37, Zahngetriebe Modell [Raim09]

Translatorische Gesamtsteifigkeit $\frac{1}{c_{ges}} = \frac{1}{c_{P1}} + \frac{1}{c_B} + \frac{1}{c_{P2}}$, wobei hier die Zugstrangsteifigkeit mit der Beziehung $c_B = \frac{4 \cdot c_{Bspez}}{L_b}$ und die Zahnsteifigkeiten je Scheibe mit der Beziehung $c_P = c_{Pspez} \cdot z_e$ eingehen.

Die Größe c_{Bspez} kann von der Formel $c_{Bspez} = \frac{F_{zul}}{\Delta l_{(1m)}}$ berechnet werden. Die maximal zulässige Zugkraft F_{zul} sowie der zugehörige Dehnwert sind in den Katalogen dokumentiert. Aus Continental Katalog geht die zulässige Zugkraft $F_{zul} = 787 N$ hervor. Der zugehörige Dehnwert liegt bei 4mm je 1m Riemenlänge. Spezifische Federsteifigkeit $c_{Bspez} = \frac{F_{zul}}{\Delta l_{(1m)}} = \frac{787}{0,004} = 196750 N$

Tension member strength (permitted tensile force of the belt F_{zul}), Belt weight										
Belt width	b	[mm]	6	10	16	25	32	50	75	100
Tension member strength F_{zul}		[N]	417	787	1342	2175	2823	4489	6803	9117
Belt weight	AT 5 GEN III	[kg/m]	0,022	0,036	0,058	0,090	0,115	0,180	0,270	0,360

Abbildung 38, Bestimmung der zulässigen Zugkraft [Cont12]

Spezifische Steifigkeit je eingreifenden Einzelzahn gemäß unterliegender Tabelle

[Raim09] $c_{Pspez} = \frac{10}{16} 144000 \Rightarrow c_{Pspez} = 90000 \frac{N}{m}$

			Riemenbreite in mm					
			16	25	32	50	75	100
AT5	F_{m1}	N	1.300	2.000	2.800	4.200		
	c_{Bspez}	10^3 N	330	500	650	1.050		
Normal-Lücke	c_{Pspez}	10^3 N/m	144	225	288	450		
se-Lücke	c_{Pspez}	10^3 N/m	192	300	384	600		
0-Lücke	c_{Pspez}	10^3 N/m	240	375	480	750		

Abbildung 39, Bestimmung der spezifischen Steifigkeit [Raim09]

$$\text{Zugstrangsteifigkeit } c_B = \frac{4 \cdot c_{Bspez}}{L_b} = \frac{4 \cdot 196750}{0,480} = 1639583 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$\text{Zahnsteifigkeit } c_{P1} = c_{Pspez} \cdot z_e = 90000 \cdot 13 = 1170000 \frac{\text{N}}{\text{m}},$$

$$c_{P2} = c_{Pspez} \cdot z_e = 90000 \cdot 16 = 1440000 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$\text{Translatorische Gesamtsteifigkeit } \frac{1}{c_{ges}} = \frac{1}{c_{P1}} + \frac{1}{c_B} + \frac{1}{c_{P2}} \Rightarrow c_{ges} = 463165 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$\text{Verdrehsteifigkeit } k = \frac{d_{w2}^2 \cdot c_{ges}}{4} = \frac{0,09549^2 \cdot 463165}{4} = 1055,89 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

$$\text{Verdrehwinkel } \varphi = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{M_1 \cdot i}{k} = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{1,30 \cdot 2}{1055,89} = 0,141^\circ$$

5.3.8 Berechnung der Vorspannkraft (Fv)

$$\text{Umfangskraft } F_u = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot M_1 \cdot i}{d_{w2}} = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot 1,3 \cdot 2}{95,49} = 54,46 \text{ N}$$

$$\text{Vorspannkraft je Trum } F_v \geq \frac{1}{2} \cdot F_u = \frac{1}{2} \cdot 54,46 = 27,23 \text{ N} \rightarrow 28 \text{ N}$$

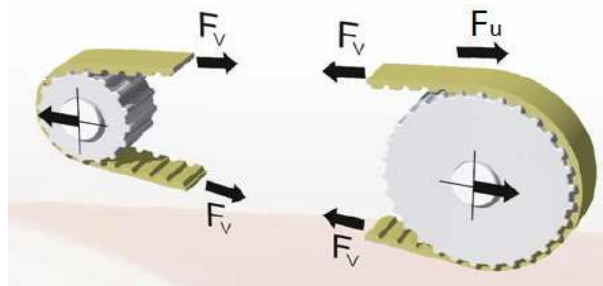


Abbildung 40, Riemenkräfte [Cont12]

Zur Optimierung einer verdrehsteifen und winkeltreuen Übertragung ist eine Heraufsetzung der Vorspannung auf $1,5 \dots 2,5 \cdot F_u$ [Raim09] zu empfehlen. Eine Vergrößerung der Vorspannkraft bewirkt Positionsänderungen der in den jeweiligen

Scheibenlücken nahe am Einlauf oder am Auslauf befindlichen Riemenzähne. Die Formpaarung wird durch Teilungsveränderung im Wesentlichen dadurch spielfrei (nächste Abbildung).

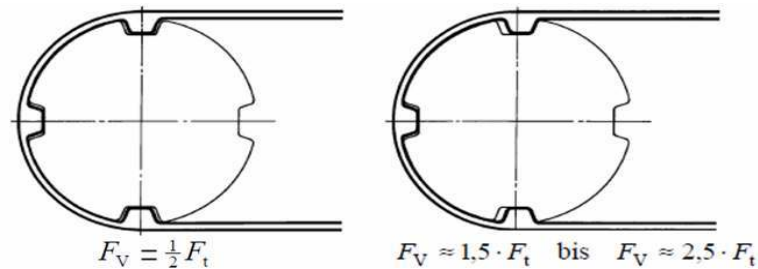


Abbildung 41, spielfreie Übertragung durch Übervorspannung [Raim09]

Um diese quasi spielfreie Funktion zu erreichen, ist zu empfehlen, die zugehörigen Zahnscheiben mit einer „Null“-Lücke bis 24, die „se“-Lücke ab 25 bis 48 und die Normallücke ab 49 Zähnen einzusetzen.

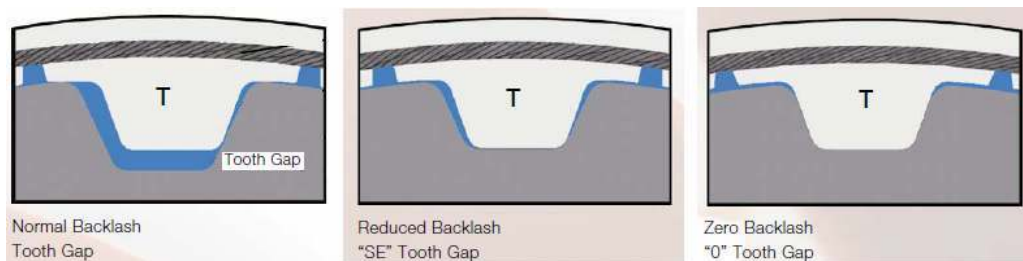


Abbildung 42, normale, enge und null Lücke [Cont12]

Wenn die zulässige Achslast nicht überschritten ist, die Vorspannkraft kann $F_v = 1,5 \dots 2,5 \cdot F_u \approx 81N \dots 136N \rightarrow 100N$ sein.

Die Vorspannkraft wird über die Riemendehnung eingestellt. Der Spannweg Δa in mm ergibt sich aus der Vorspannkraft, der Riemenlänge sowie der Riemen-Federkonstant.

$$\Delta a = \frac{F_v \cdot L_b}{2 \cdot c_{\text{Spez}}} = \frac{100 \cdot 480}{2 \cdot 196750} \approx 0,12 \text{ mm}$$

5.4 Zahnriemenantrieb

Der Antrieb soll über die folgenden Eigenschaften verfügen:

- Minimale Höchstdrehzahl : 300 Upm
- Minimales Höchstdrehmoment : 0,227 N · m
- Hohe Winkelauflösung

- Leistung $> \frac{M_b \cdot n}{i \cdot 9,55} = \frac{0,227 \cdot 300}{2 \cdot 9,55} = 3,57 \text{ Watt}$

Für einen einfachen Betrieb ohne Messsysteme ist der Auswahl eines Schrittmotors entschieden. Das Labor besitzt schon ein Controller der Firma Orientalmotor und deswegen wurde ein Motor aus dem selben Hersteller bevorzugte. Damit eine hohe Auflösung und gleichzeitig hohe Belastbarkeit der Achsen erreicht werden, ist als Antrieb das Modell CRK566PMBP verwendet. Der Motor und der Treiber zusammen kosteten 312 €, während ihre technische Daten auf Abbildung 44 zu sehen sind.

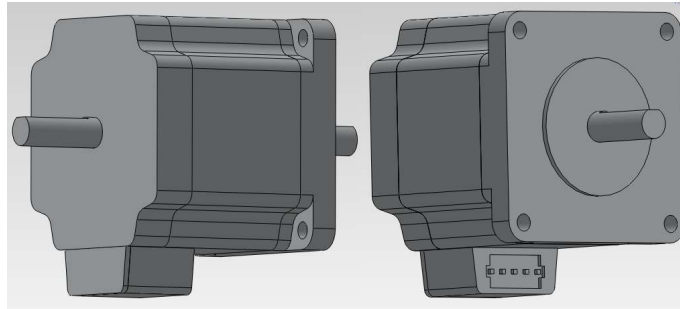


Abbildung 43, 3D-Zeichnungen des Schrittmotors

Damit der Motor mit den anderen Bauteile zusammengebaut werden kann, sind die 3D-Zeichnungen heruntergeladen worden und der Abbildung 43 dargestellt.



Produkt Code: ⓘ	CRK566PMBP
Basis-Schrittinkel:	0.36°
Erregungsmodus:	Mikroschritt
Max. Haltedrehmoment:	1.3 Nm
Motor:	PK566PMB
Nennstrom:	1.4 A/Phase
Rahmengröße:	60 mm
Rotorträgheit:	500x10 ⁻⁷ J·kgm ²
Stromversorgungseingang:	24 VDC ±10 % 2.5 A
Treiber:	CRD5114P
Typ:	Hohe Auflösung
Wellentyp:	Doppelwelle

Abbildung 44, technische Daten CRK566PMBP [Ori14]

5.5 Vorspannbauteil

Laut Beitrag 5.3.8, muss die Dehnung des Riemens ($\Delta\alpha$) in der Größe von 0,18 mm sein. Wegen des Unterschieds in der Größe der beiden Zahnräder muss der Abstand Δl aus der folgenden Formel berechnet werden (siehe Abbildung 45).

$$\cos\theta = \frac{\Delta l}{\Delta\alpha} \Rightarrow \Delta l = \cos\theta \cdot \Delta\alpha = \cos 11^\circ \cdot 0,12 \Rightarrow \Delta l = 0,118\text{mm}$$

Das heißt, dass der neue Achsabstand 0,118 mm größer sein muss, nämlich $C_{neu} = 125,22 + 0,118 = 125,338\text{mm}$.

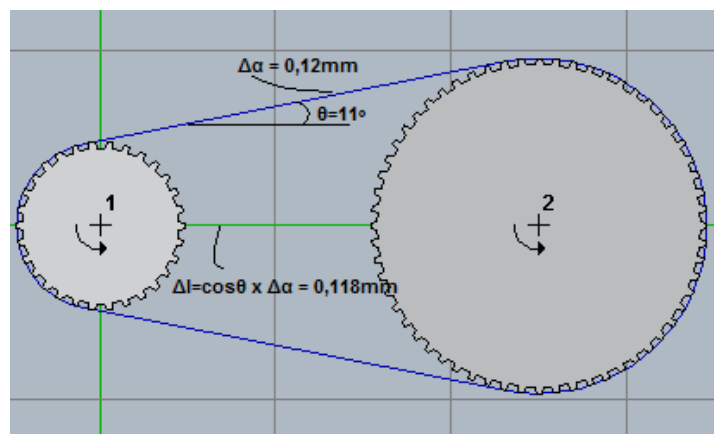


Abbildung 45, Riemendehnung Berechnung

Die kleine Entfernung der Wellen kann leicht erreicht werden, beispielsweise mit der Verschiebung des Motors. Daher ist das unter dargestellte Bauteil (Abbildung 46) entwickelt und geplant.

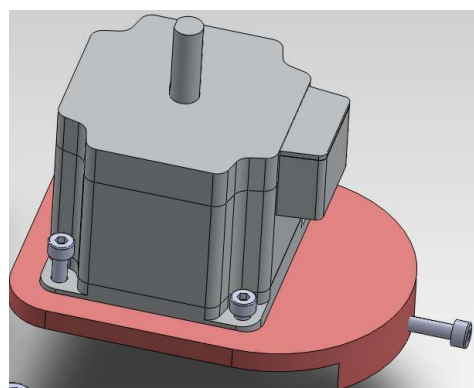


Abbildung 46, Vorspannmechanismus

Eine M4 Schraube stellt den Achsabstand ein. Die Steigung der Gewinde ist 0.7 mm, also bei einem Drehwinkel der Stellschraube von $\frac{0,118}{0,7} * 360^\circ \approx 60^\circ$ ist die genaue Verschiebung der Motorwelle erreicht.

5.6 Schleifscheibe und Antrieb

Auf dem oberen Teil der Baugruppe legen zwei Schleifscheiben, eine mit grober Diamantkörnung zur Vorstrukturierung der Mikrofräser und eine mit dünner zur Feinstrukturierung. Die Modelle der Scheiben heißen NBC-ZH204J und kommen von der Firma DISCO Corporation (Abbildung 47).



Abbildung 47, Schleifscheibe Disco NBC-ZH204J

Zur Fertigung der Mikrofräser ist einerseits die Umdrehung der Scheiben mit einer Drehgeschwindigkeit von etwa 10.000 U/min notwendig. Andererseits muss diese Umdrehung über einen sehr geringen Rundlauffehler von unter 1 μm verfügen. Darüber wurden zwei Lösungen überlegt und vorgeschlagen. Die Erste war die Nutzung zweier luftgelagerten Spindeln, eines Gleichstrommotors und als Getriebe könnte die Keilriemengetriebe bevorzugt werden. Auf der Abbildung 48 wird das Konzept dieser Lösung abgebildet, die aber letztlich abgelehnt wurde. Die Gründe dafür waren: Erstens die Komplexität der Konstruktion wegen den luftgelagerten Spindeln und der Keilriemengetriebe und zweitens das große Gewicht, im Vergleich zu der zweiten Lösung.

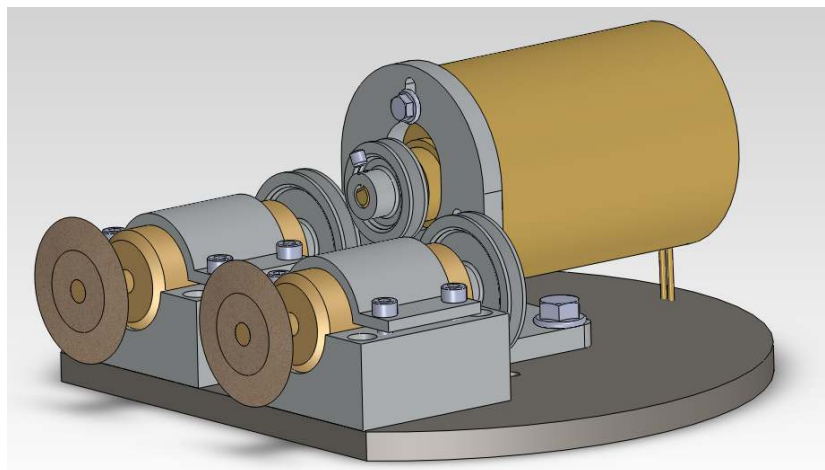


Abbildung 48, Konzept der ersten Lösung

Die zweite Lösung war die direkte Nutzung zwei bürstenloser Motoren, die wie bekannt ist, über ein geringes Gewicht zu Leistung Verhältnis verfügen. Der minimale Rundlauffehler ist mit der Nutzung eines speziellen Motors gewährleistet, der in der Festplatten Industrie (Hitachi) verwendet wird. Die maximale Drehzahl des Motors beträgt 11250 U/min (12V Spannung) und der Rundlauffehler wurde weniger als 1 μm in senkrechter Orientierung der Achse gemessen (Abbildung 50 links). In waagerechter Orientierung hingegen wurde weniger als 0.2 μm gemessen (Abbildung 50 rechts). Diese Orientierung ist leider für unsere Anwendung nicht geeignet. Auf der Abbildung 49 ist das verwendete Messgerät gezeigt. Die verwendete Software war Spindle Error Analyzer Version 8 des Unternehmens Lion Precision.

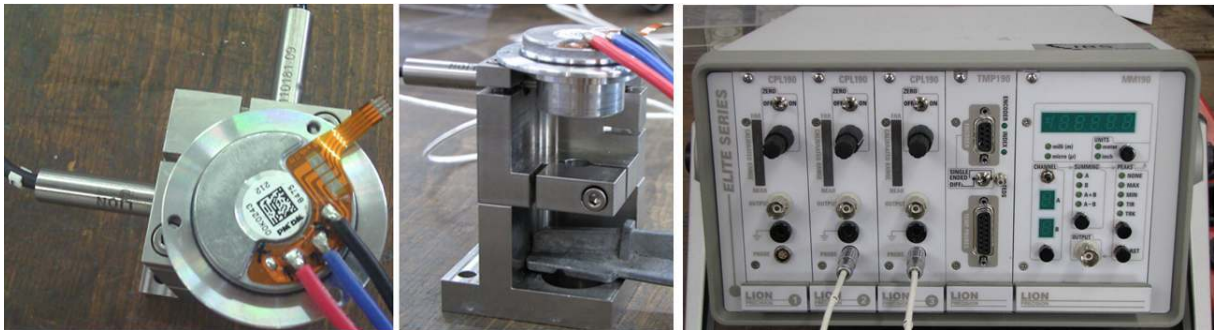


Abbildung 49, Messgerät des Rundlauffehlers

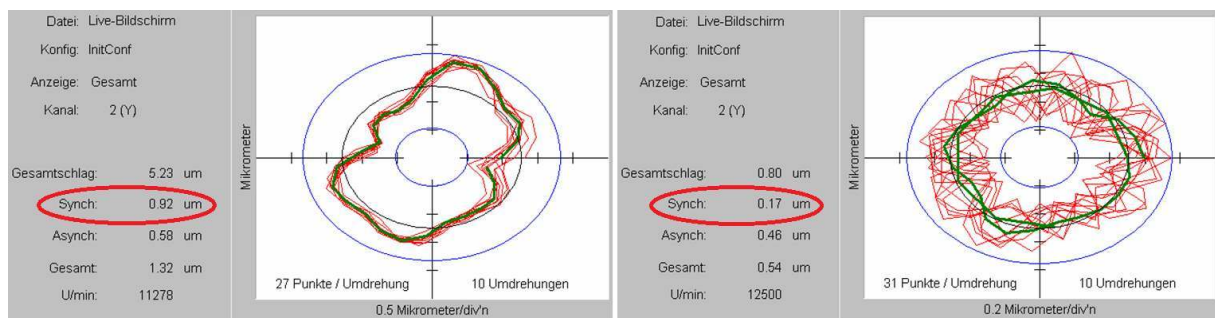


Abbildung 50, Ergebnisse des Spindle Error Analysers

Sowohl das 3D-Modell als auch das Bild vom bürstenlosen Motor ist auf der Abbildung 51 zu finden.

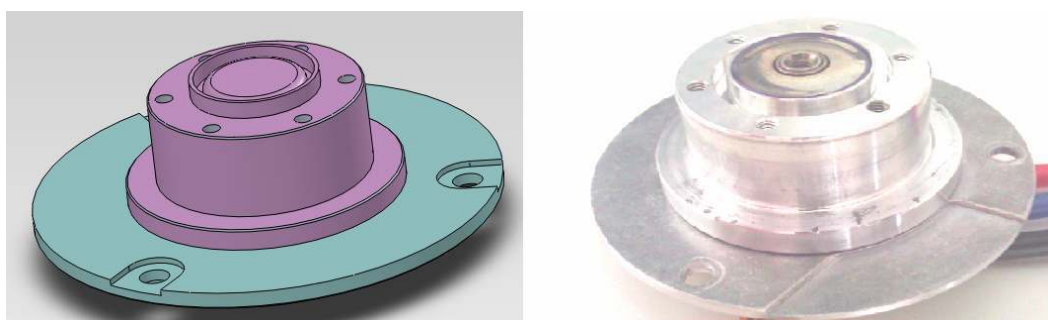


Abbildung 51, bürstenloser Festplattenmotor

5.7 Schleifscheibenhalter

Damit die Schleifscheibe mit dem Motor montiert werden kann, ist die Herstellung eines neuen Bauteiles notwendig, der zwischen der Scheibe und des Motors zusammengesetzt werden wird. Das Zusammenbauen dieses Teiles mit dem bürstenlosen Motor und der Scheibe ist auf dem nächsten Bild abgebildet.

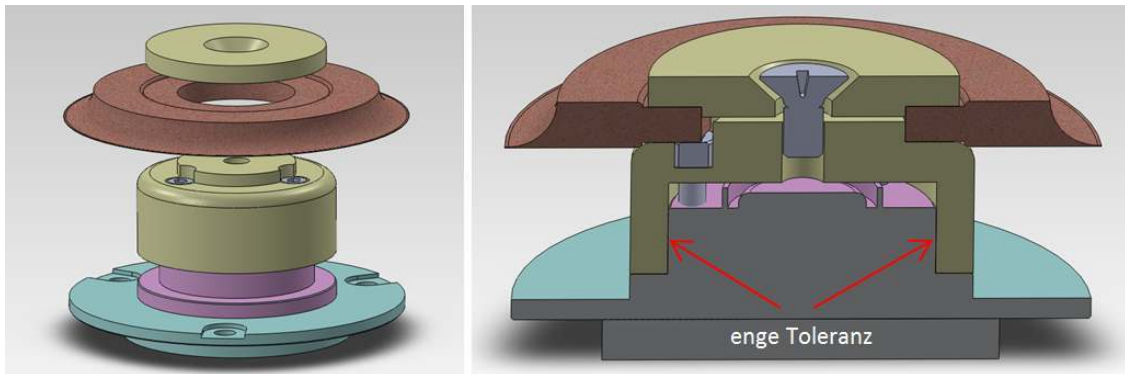


Abbildung 52, Zusammenbau Motor - Schleifscheibe

Bei dem Herstellungsverfahren des Schleifscheibenhalters sind besonders zwei Sachen berücksichtigt worden. Erstens musste eine sehr enge Toleranz (Abbildung 52) zwischen dem Motor und der inneren Oberfläche des Bauteiles gewährleistet werden und zweitens musste die Exzentrizität der Zylinderfläche möglichst Null sein. Die beiden Faktoren können durch entstehende Schwingungen den Rundlauffehler beeinflussen. Aus diesem Grund war die Feinbearbeitung des hergestellten Teiles notwendig (siehe Abbildung 53). Das Verfahren ist auf einer Ultra-Präzisions-Drehmaschine realisiert, die auf der Abbildung 54 dargestellt ist.



Abbildung 53, Feinbearbeitung des Schleifscheibenhalters



Abbildung 54, LT-Ultra MTC250, Ultrapräzise Drehmaschine

5.8 Drehzahlsteuerung der Schleifscheibe

In Beitrag 5.6 ist erwähnt, dass der Antrieb der Scheibe ein bürstenloser Dreiphasenmotor ist. Bürstenlose Motoren (auch als elektronisch kommutierte Motoren bekannt) sind synchrone Motoren, die durch einen Wechselrichter mit Strom versorgt werden. Also, solche Motoren benötigen ein elektrisches Wechselstromsignal, damit sie funktionieren können. Dieses Signal ist nicht sinusförmig, sondern ein bidirektionaler Strom, der beliebig Wellenform haben kann. In den folgenden Beiträgen sind die wichtigsten Schritte dargestellt, damit ein komplettes Drehzahlsteuerung-Gerät aufgebaut werden kann.

5.8.1 Elektronischer Drehzahlregler (E.S.C.)

Der elektronische Drehzahlregler (E.S.C.: Electronic Speed Controller) ist eine elektronische Schaltung, deren Ziel die Drehzahlsteuerung eines bürstenlosen Motors ist. Er bietet dem Motor einen elektronisch erzeugten Dreiphasen-Strom, dessen elektrische Spannung niedrig ist. Die Reihenfolge der Erregung der Spulen ist auf der Abbildung 55 zu sehen.

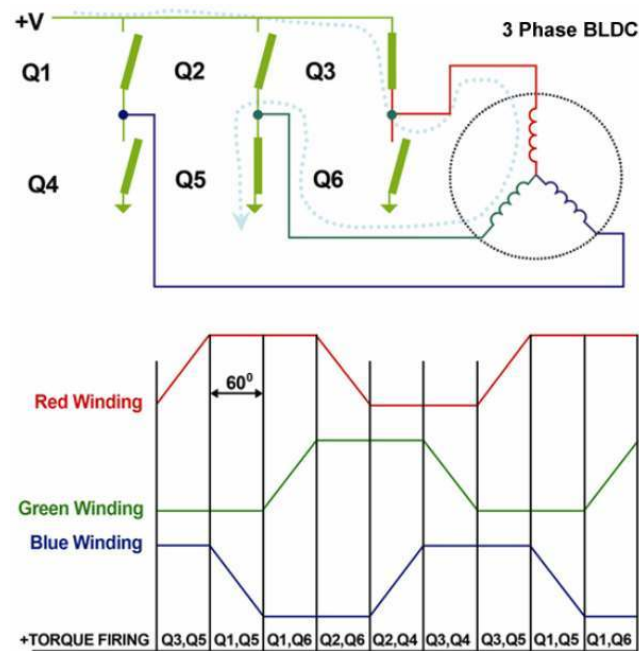


Abbildung 55, Erregung der Spulen

Der ESC hat drei Anschlüsse, zum einen Strom, dann zum Motor und zu guter Letzt den Anschluss an den Mikrocontroller. (Siehe Abbildung 56).

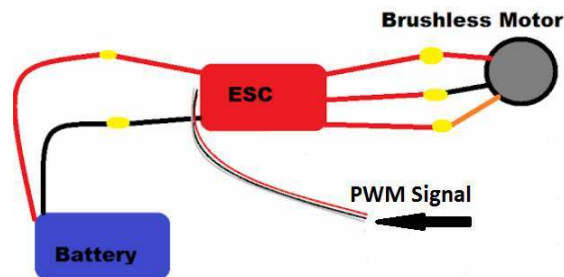


Abbildung 56, ESC-Anschlüsse

5.8.2 Mikrocontroller

Der Mikrocontroller ist ein kleiner Computer in einem einzigen integrierten Schaltkreis. Er enthält einen Prozessor und alle benötigten Bausteine wie Speicher, Zeitgeber, digitale / analoge Ein- und Ausgabegeräte, usw. Alle Komponenten sind dabei auf einem Chip, deshalb bezeichnet man den Mikrocontroller auch als Ein-Chip-Mikrorechner.

Damit der elektronische Drehzahlregler (E.S.C.) kontrolliert werden kann, braucht man eine PWM (Pulsweitenmodulation) Quelle. Die meisten Mikrocontroller verfügen über ein oder mehrere PWM-Module und sind deshalb geeignet für die Regelung des E.S.C. Die Steuerung ist folgendermaßen durchgeführt. Ein PWM-Signal mit 500Hz Frequenz ist über einen Mikrocontroller erzeugt, der durch den Tastgrad eingestellt wird. Braucht man die schnellste Drehrate, stellt man die Pulsbreite auf 2 ms ein.

Umgekehrt, damit wir die langsamste Drehrate erreichen werden, stellen wir die Pulsbreite auf 1 ms ein, wie auf Abbildung 57 zu sehen ist.

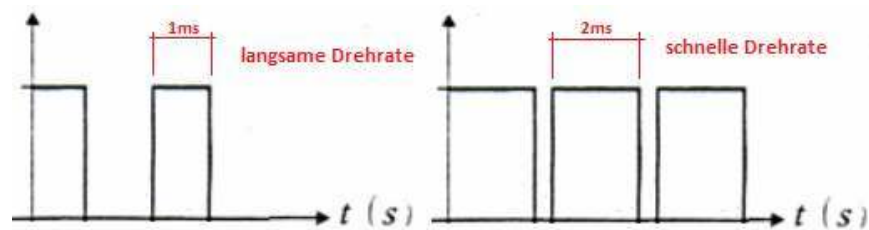


Abbildung 57, Impulsformen zur ESC-Steuerung

Für die Einstellung der Drehrate ist die Benutzung eines Potenziometers notwendig. Die aus dem Potenziometer erzeugte variable Spannung muss durch ein Analog zu Digital Modul (ADC) gemessen werden. Der PIC16F690 Mikrocontroller der Firma Microchip verfügt unter anderen über zwölf ADC Module und drei Zeitgeber, mehr als genügend für die Anwendung. Die Funktion des Zeitgebers wird auf dem Beitrag 5.8.3 erläutert werden.

5.8.3 Infrarotsensoren

Einige Materialien reflektieren das Infrarotlicht und andere nicht. Beispielsweise, glatte metallische Oberflächen reflektieren mehr im Vergleich zu rauen Oberflächen. Auf diesem Prinzip basiert das entwickelte Drehzahl-Messsystem (Abbildung 58).

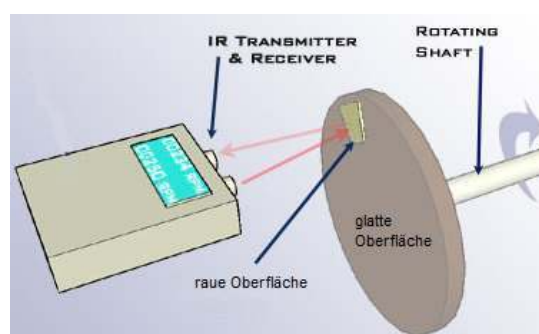


Abbildung 58, Prinzip des Drehzahl-Messsystems

Eine infrarote LED leuchtet auf einem rotierenden Teil (der Schleifscheibenhalter). Die glatte zylindrische Oberfläche des Teiles wurde erst durch Laserstrahlen bearbeitet, sodass nicht die ganze Oberfläche reflektierbar ist (siehe Abbildung 59). Die Reflexion wird gemessen und durch elektronische Schaltung zu digitalen Impulsen umgewandelt. Der Mikrocontroller misst mit der Hilfe von integrierten

Zeitgebern die Zahl der Impulse pro Sekunde und rechnet die Drehrate. Das Resultat wird als Drehzahl auf dem LCD Monitor dargestellt.

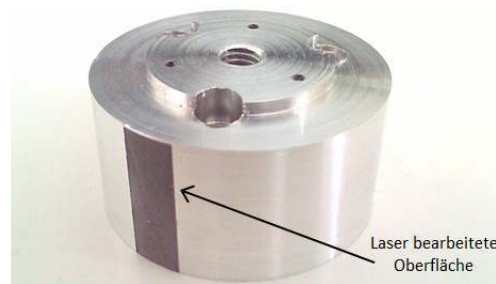


Abbildung 59, Bauteil nach der Laser-Bearbeitung

5.8.4 Schaltkreis

Der Schaltkreis des Drehzahlsteuerung-Geräts ist in vier Teilschaltungen unterteilt:

- Die infraroten Sensoren
- Analoge Regelung
- LCD Monitor
- Elektronischer Drehzahlregler (E.S.C.)

Sowohl der Gesamtschaltplan als auch die vorerwähnten Teilschaltungen sind auf der Abbildung 60 zu sehen. Das verwendete Programm war Multisim 10.1 des Softwareunternehmens „National Instruments“

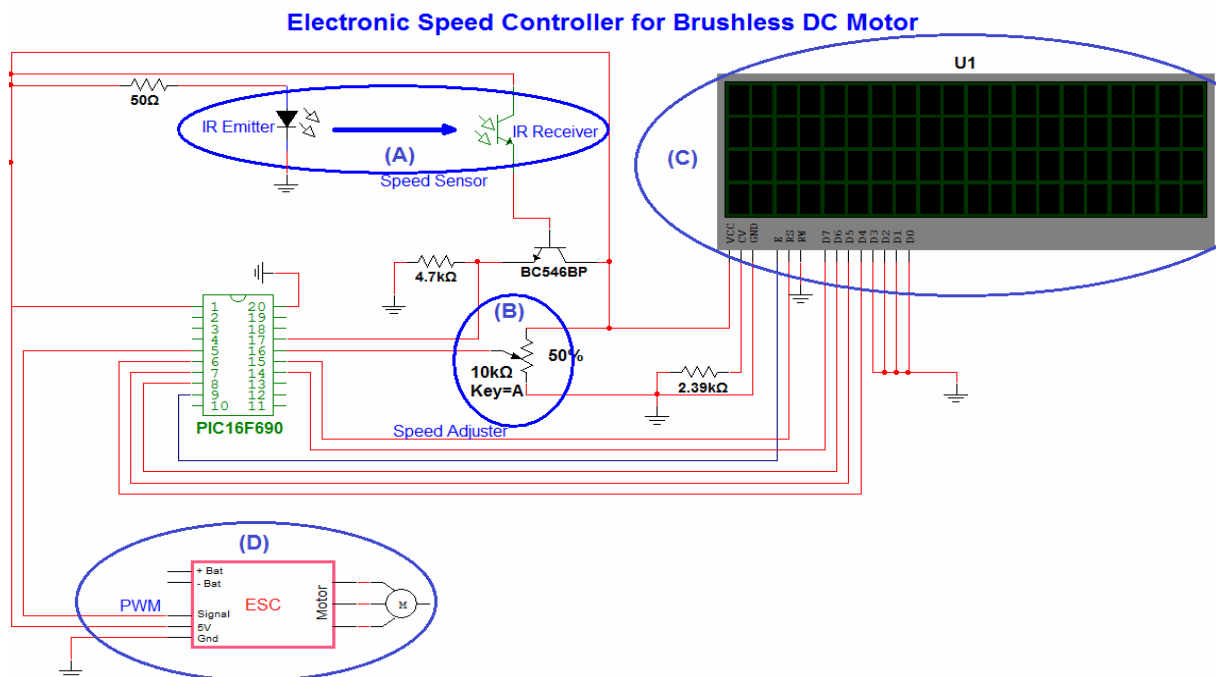


Abbildung 60, Gesamtschaltplan

5.8.5 Programm

Sowohl die verwendete Programmiersprache MikroC Pro als auch der Programmer und Entwicklungsboard EasyPic 5 kommen von der Firma Mikroelektronika. Es folgt der entwickelte Code.

```
// LCD module connections
sbit LCD_RS at RC1_bit;
sbit LCD_EN at RC7_bit;
sbit LCD_D4 at RC4_bit;
sbit LCD_D5 at RC3_bit;
sbit LCD_D6 at RC6_bit;
sbit LCD_D7 at RC2_bit;

sbit LCD_RS_Direction at TRISC1_bit;
sbit LCD_EN_Direction at TRISC7_bit;
sbit LCD_D4_Direction at TRISC4_bit;
sbit LCD_D5_Direction at TRISC3_bit;
sbit LCD_D6_Direction at TRISC6_bit;
sbit LCD_D7_Direction at TRISC2_bit;
// End LCD module connections

int i;
int j;
int DutyC;
short int IntCount=0;
int Pulsecount1=0;
int Pulsecount2=0;
unsigned short PPS1=0;           // PPS : Pulses per second
unsigned short PPS2=0;
unsigned int UPM1=0;             // UPM : Umdrehungen pro Minute
unsigned int UPM2=0;
char txt1[7];
char txt2[7];

void interrupt() {
  // Every second
  if (TMR2IF_bit) {
    TMR2IF_bit=0;           // clear TMR2IF
    IntCount++;
    if (IntCount>30)
    {
      IntCount=0;
      PR2= 0xFA;
      PPS1=Pulsecount1;
      UPM1=PPS1*60;
      PPS2=Pulsecount2;
      UPM2=PPS2*60;
      Pulsecount1=0;
      Pulsecount2=0;
    }
  }

  if (TMR1IF_bit) {
    TMR1IF_bit = 0;           // clear TMR1IF
    TMR1H = 0xFF;
    TMR1L = 0xFF;
    Pulsecount1++;
  }

  if (TOIF_bit) {
    TOIF_bit = 0;           // clear TOIF
    TMR0 = 0b11111111;

    Pulsecount2++;
  }
}

void InitMain() {
  ANSEL = 0b00000001;       // Configure AN pins as digital I/O
  ANSELH = 0;
  C1ON_bit = 0;             // Disable comparators
  C2ON_bit = 0;
  PORTA = 255;
  TRISA = 255;              // configure PORTA pins as input
}
```

```

PORTB = 0; // set PORTB to 0
TRISB = 0; // designate PORTB pins as output
PORTC = 0; // set PORTC to 0
TRISC = 0; // designate PORTC pins as output

// RC0 Analog Input
TRISC.RC0=1;
ANS4_bit = 1;

// 8 Mhz clock speed
OSCCON.IRCF2 = 1;
OSCCON.IRCF1 = 1;
OSCCON.IRCF0 = 1;

// TMR0
T0CS_bit = 1; // TMR0 Clock Source Select bit
INTEDG_bit = 0; // Transition on RA2 pin
T0SE_bit = 0; // Interrupt on falling edge
PSA_bit = 1; // Increment on low-to-high transition
PS2_bit = 0; // Disable Prescaler
PS1_bit = 0;
PS0_bit = 0;
TMR0 = 0b11111111; // Timer0 initial value

// TMR1
TMR1ON_bit = 1; // enable Timer1 on RA5 pin
TMR1CS_bit = 1; // External clock from T1CKI pin
T1OSCEN_bit = 0; // Disable LP Oscillator

T1CKPS1_bit = 0; // Disable Prescaler
T1CKPS0_bit = 0;
//T1SYNC_bit = 1; // Do not synchronize external clock input
TMR1H = 0xFF; // Timer1 initial value
TMR1L = 0xFF;

//Prescaler to TMR2 & Enable TMR2
T2CON = 0b01111111;

// Enable Interrupts
INTCON.PEIE = 1;
INTCON.GIE = 1;
INTCON.T0IE = 1; // enable Timer0 interrupt
TMR1IE_bit = 1; // enable Timer1 interrupt
TMR2IE_bit = 1; // enable Timer2 interrupt

PWM1_Init(489); // Initialize PWM1 module at 489Hz

Lcd_Init(); // Initialize LCD

Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR); // Clear display
Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF); // Cursor off
}

void main() {
  initMain();
  Lcd_Out(1,1,"Loading...");
  Delay_ms(2000);
  PWM1_Start(); // start PWM1

  // Initialize ESC Module
  Lcd_Out(1,1,"Initialising");
  Lcd_Out(2,1,"ESC Controller..");
  PWM1_Set_Duty(250);
  Delay_ms(3000);
  PWM1_Set_Duty(120);
  Delay_ms(5000);
  Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);

  DutyC=110;
  PWM1_Set_Duty(DutyC);

  Lcd_Out(1,1,"M1 (Rpm):");
  Lcd_Out(2,1,"M2 (Rpm):");

```

```
while (1)
{
    // endless loop
    DutyC = 145./1024. * ADC_Read(4)+110;
    PWM1_Set_Duty(DutyC);
    IntToStr(UPM1, txt1);
    IntToStr(UPM2, txt2);
    Lcd_Out(1,10,txt1);
    Lcd_Out(2,10,txt2);
    Delay_ms(300);
}
}
```

5.8.6 Aufbau und Test der Schaltung

Der Aufbau und Test des Schaltkreises wurde zuerst auf einem Steckbrett verwirklicht. Das Steckbrett ist eine gute Möglichkeit um schnell einen Prototypen einer Schaltung aufzubauen und in einem iterativen Entwicklungsprozess zu verbessern. Wenn die Schaltung aufgebaut ist, wird sie erst getestet und kann sie danach auf eine Leiterplatte gedruckt werden. Auf den folgenden Abbildungen ist die aufgebaute Schaltung dargestellt.

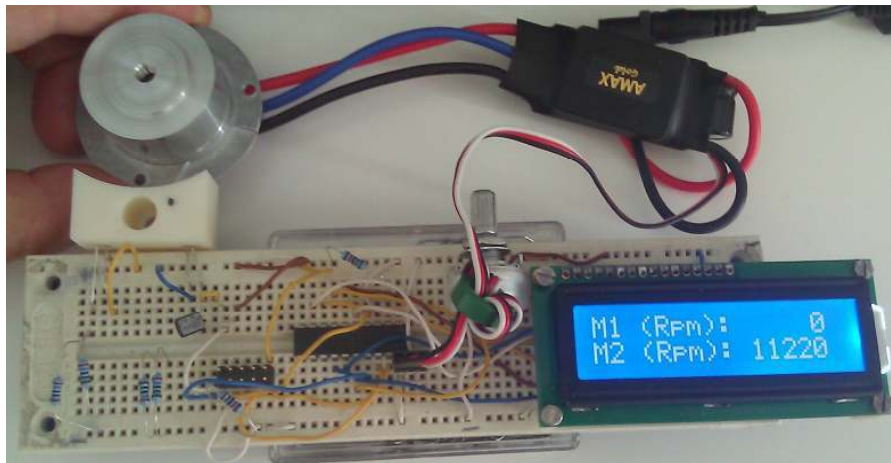


Abbildung 61, Aufbau und Test des Schaltkreises

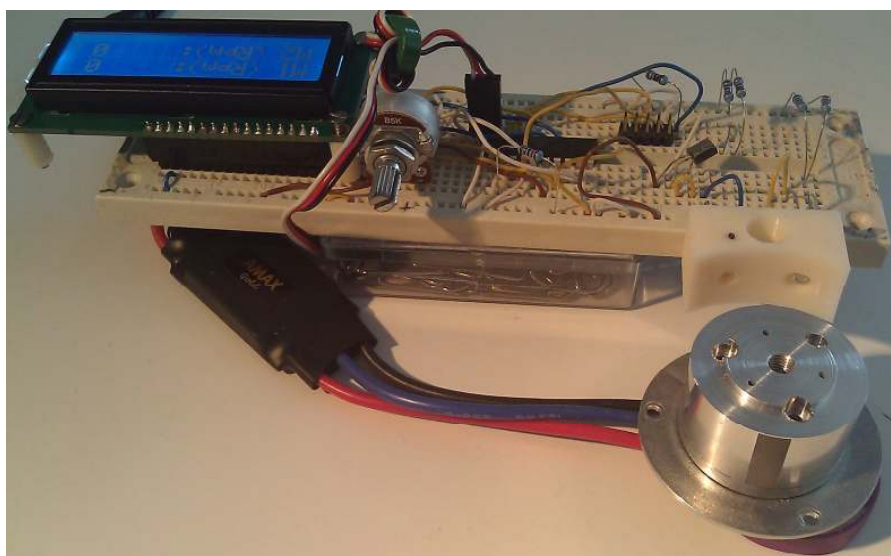


Abbildung 62, Aufbau und Test des Schaltkreises

5.8.7 Leiterplatte

Eine Leiterplatte (auf Englisch: Printed Circuit Board) ist ein Träger für elektronische Bauteile. Sie dient der mechanischen Befestigung und elektrischen Verbindung zwischen den Bauteilen. Für den besseren Aufbau des Geräts wurden zwei verschiedene Platinen geplant. Die folgenden Bilder zeigen die Zeichnungen der Platinen sowie die fertige Platinen vor und nach der Bestückung der Bauteile.

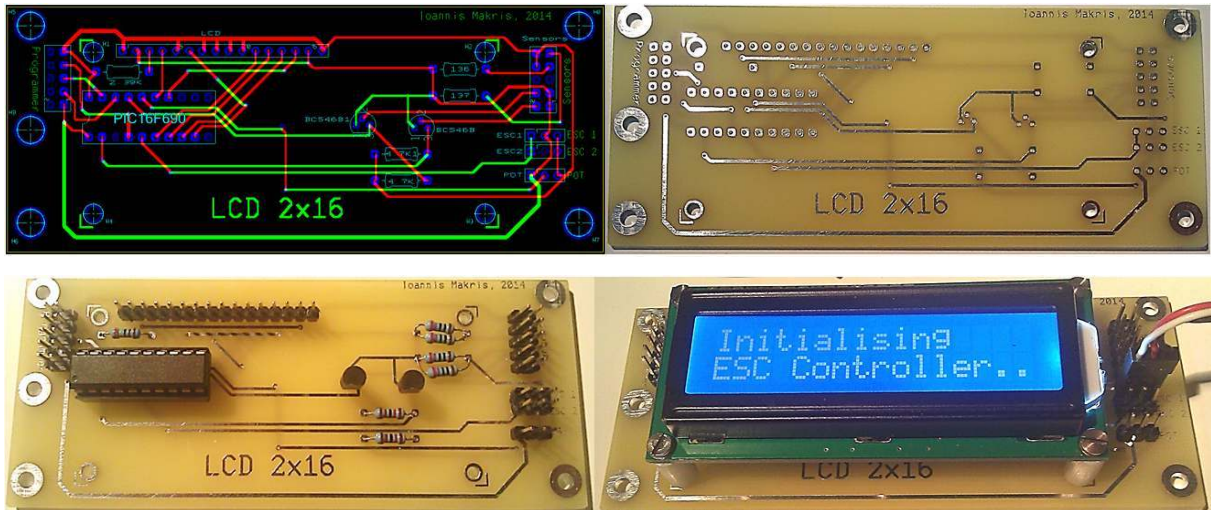


Abbildung 63, erste Platine

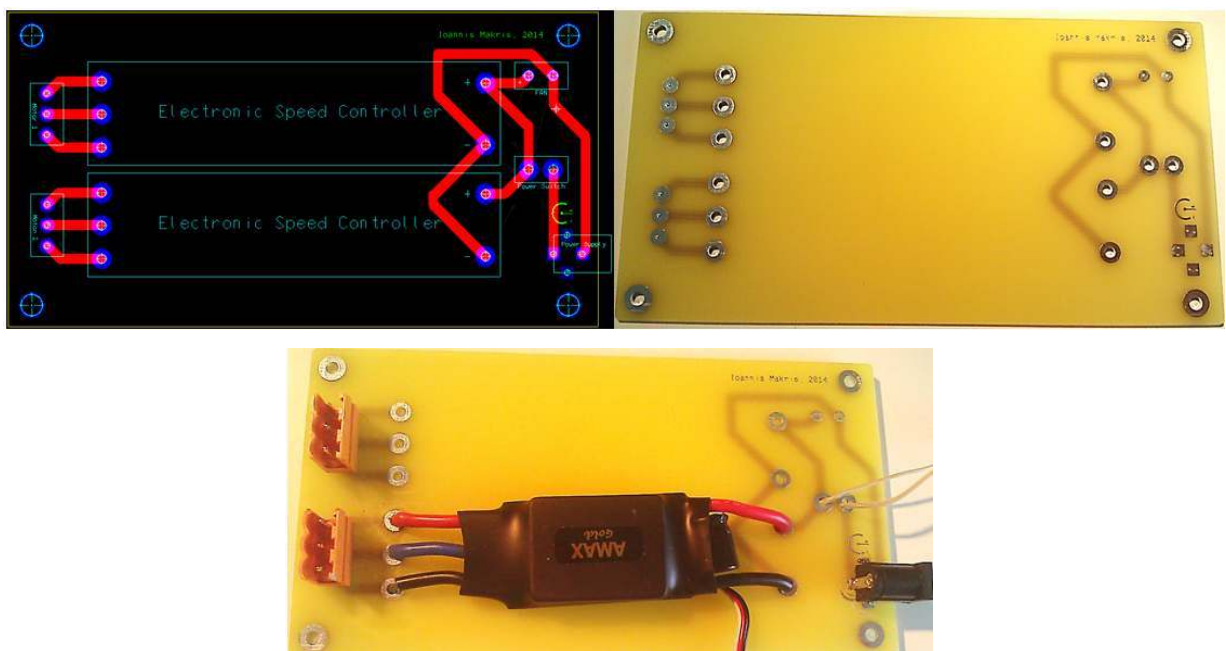


Abbildung 64, zweite Platine

Das verwendete Programm für die Erzeugung der Zeichnungen war Ultiboard 10.1 des Softwareunternehmens „National Instruments“.

5.8.8 Gehäuse

Das Gehäuse wird in drei Stücke unterteilt. Der erste und zweite Teil sind für die Aufstellung der Platinen verwendet, deren Befestigung durch insgesamt acht Blechschrauben erfolgt ist. Aufgrund der Tatsache, dass die zweite Platine (mit integriertem ESC Controller) sich erwärmt, ist die Nutzung eines Lüfters 80 mm erforderlich. Deswegen sind auf dem zweiten Teil geeignete Befestigungspunkte. Der dritte Teil ist der Deckel des ersten Stückes. Er enthält Buchsen für den LCD Monitor, die Ein-Aus Taste sowie für das Potenziometer. Die einzelnen Teile sowie der Zusammenbau des Gehäuses sind auf den folgenden Bildern zu sehen.

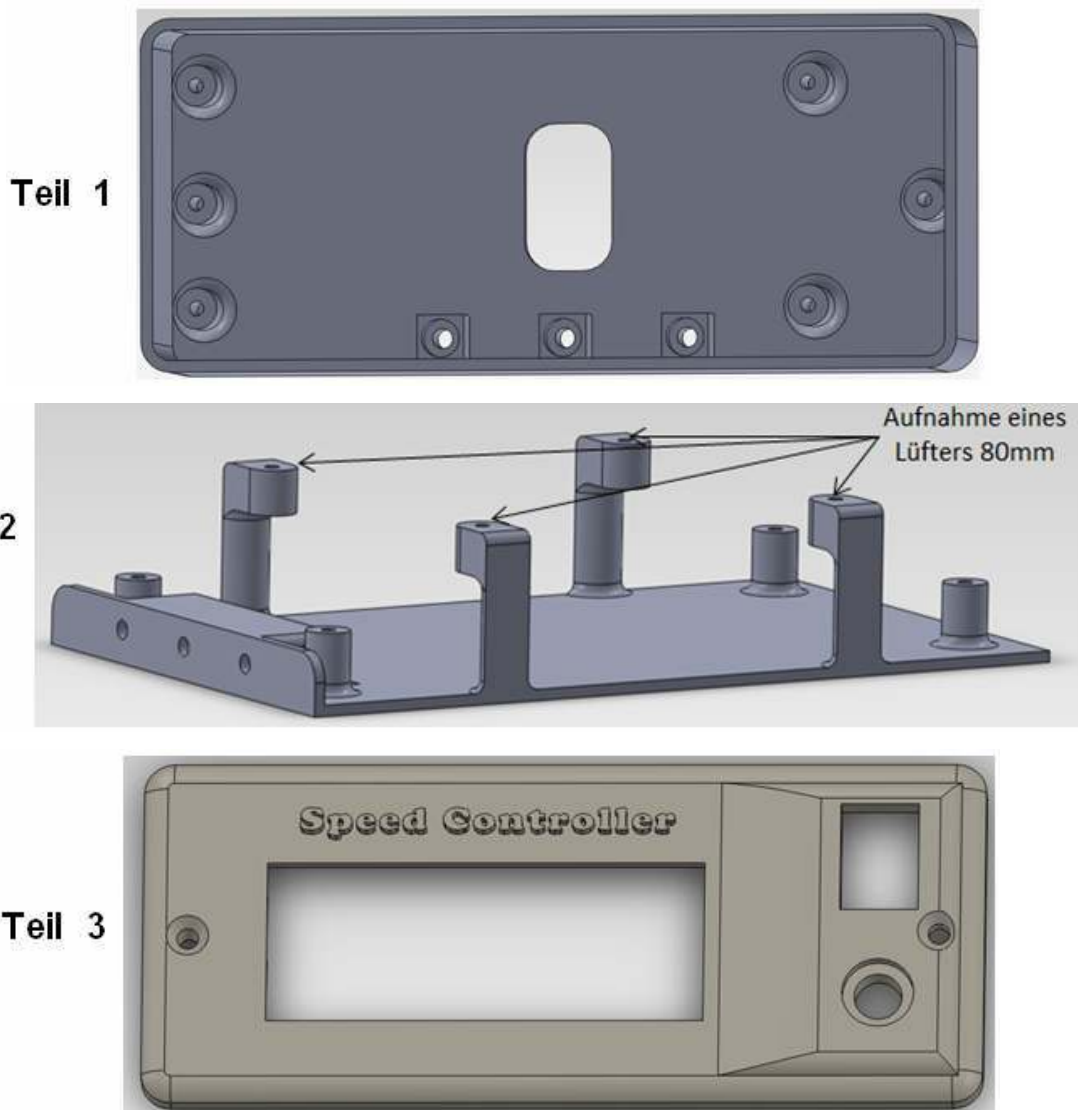


Abbildung 65, Bauteile des Gehäuses (3D Zeichnungen)

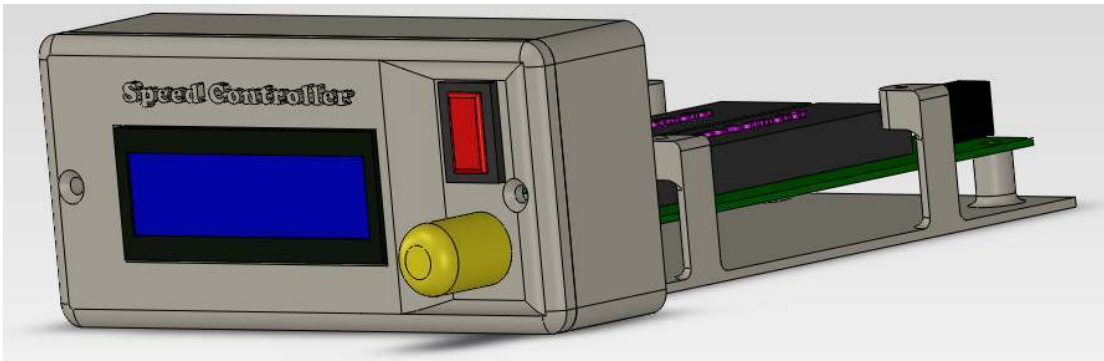


Abbildung 66, Zusammenbau des Gehäuses

Die Stücke sind auf einen 3D-Drucker erzeugt worden. Auf den nächsten Bildern wird das fertige Gerät dargestellt.



Abbildung 67, Speed Controller - fertiges Gerät

5.9 Schleifscheibenmotor-Halter, Led-Halter

Es geht um die Halter, die einerseits die bürstenlosen Motoren tragen, andererseits die infraroten Sensoren auf eine bestimmte Neigung halten. Für die genaue Einstellung des Abstands zwischen den LED und den rotierenden Teilen der Motoren ist eine einfache Art von Gleitführung verwendet. Wenn die richtige Stelle des Led-Halters herausgefunden ist, wird der Abstand durch die Einstellungsschraube (siehe Abbildung 68) fixiert.

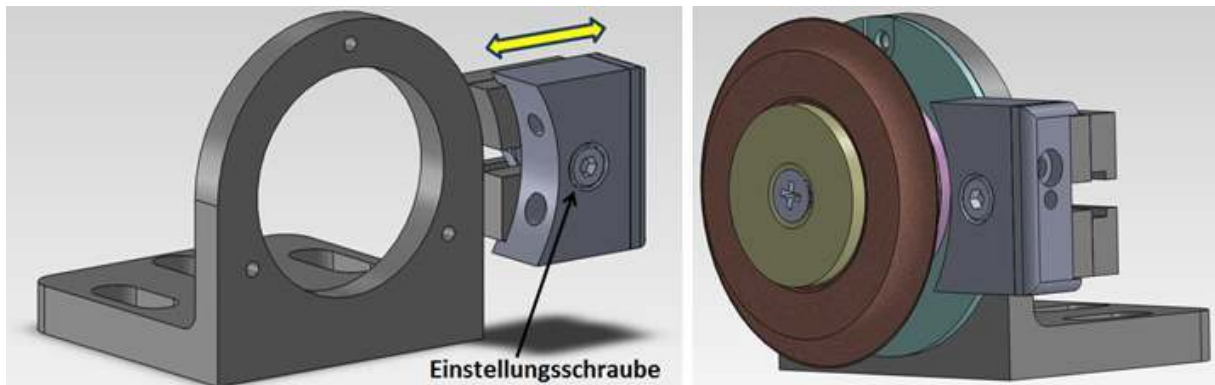


Abbildung 68, Schleifscheibenmotor-Halter mit Led-Halter

Die beiden Halter wurden auf den 3D-Drucker erzeugt und das verwendete Material ist Kunststoff. Die ausgewählte Herstellungsmethode bietet den Vorteil eines sehr leichten Endproduktes bei gleichzeitig geringen Herstellungskosten. Die folgenden Bilder zeigen die aus dem 3D erzeugten Teile.

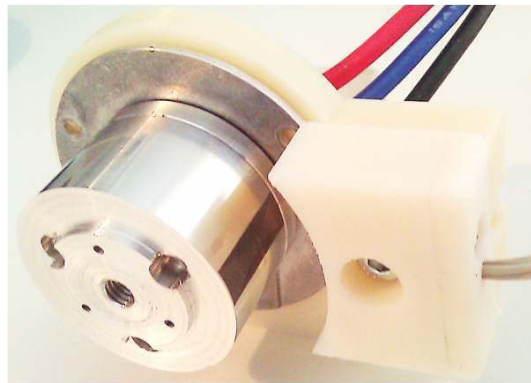


Abbildung 69, erzeugter Motorhalter Komplett

5.10 Basis

Die Basis der Konstruktion ist ein der wichtigsten Teile der Baugruppe. Auf der Basis liegen der Rundtisch und der Schrittmotor, deren Achsabstand durch vier Langlöcher verstellbar ist. Auf den nächsten Bildern werden die Zeichnungen des Bauteiles gezeigt, wie er mit den anderen Teilen zusammenpasst und welche Verbindungselemente (Schrauben, Muttern) verwendet wurden. Schließlich stellen die letzten Bilder das fertige Produkt dar.

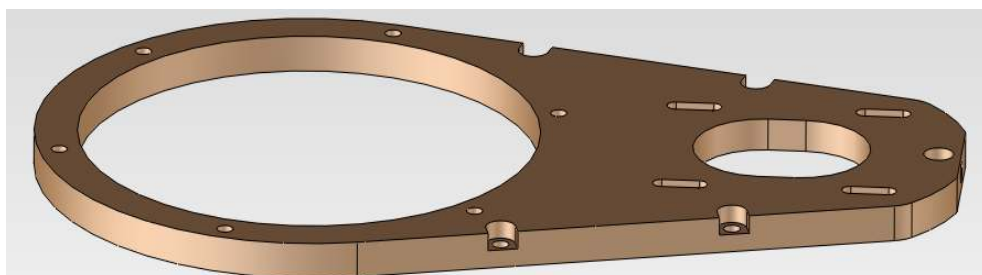


Abbildung 70, Basis

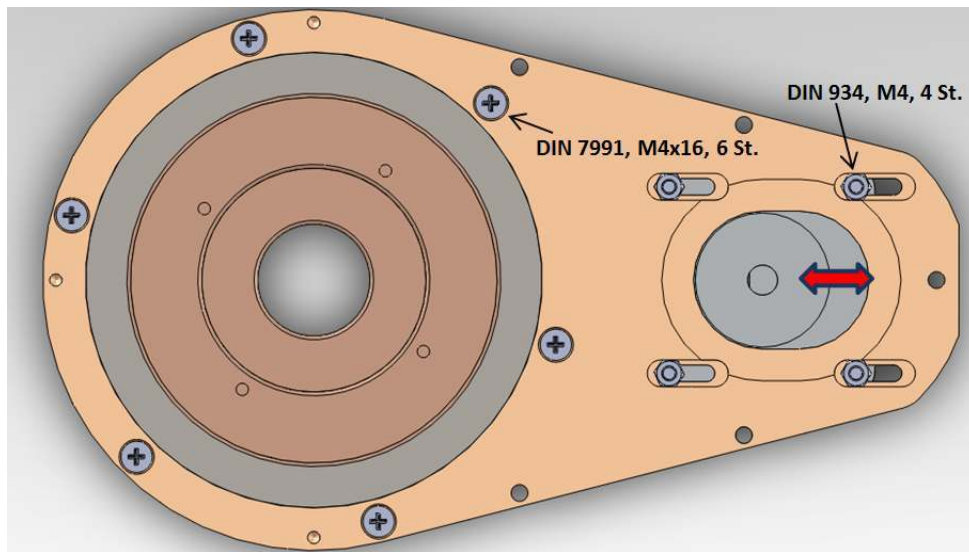
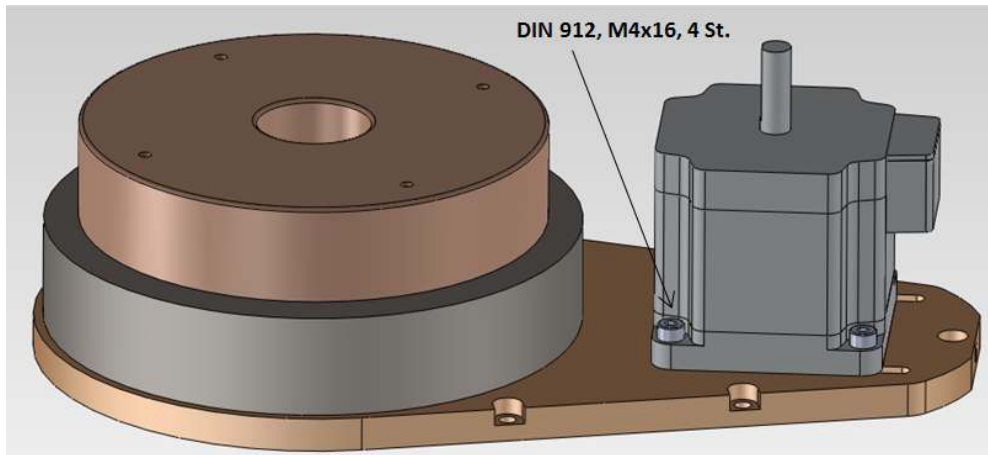


Abbildung 71, Zusammenbau der Basis



Abbildung 72, fertige Basis

5.11 Wellenflansch

Wie der Name des Bauteiles sagt, stellt dieses Teil (Abbildung 73) die Verbindung zwischen dem Rotor des Rundtisches und der großen Zahnriemenscheibe her. Vier Senkschrauben gewährleisten den festen Kontakt der Zahnriemenscheibe mit dem Wellenflansch, während ein Gewindestift die Welle mit der Zahnriemenscheibe befestigt (Abbildung 74).

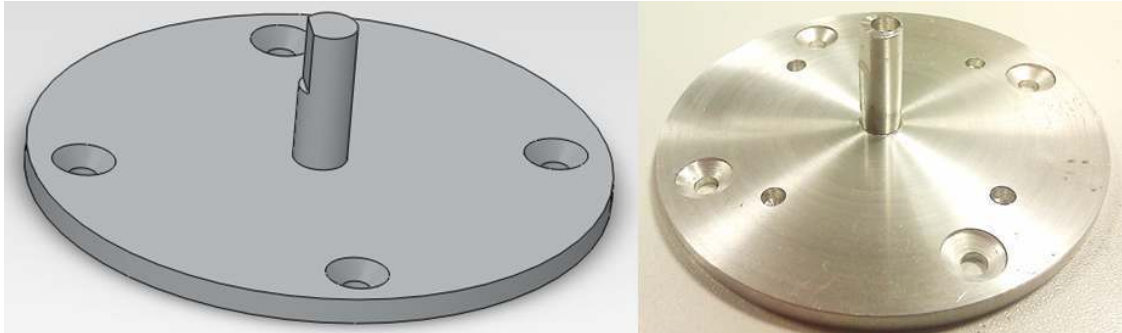


Abbildung 73, Wellenflansch

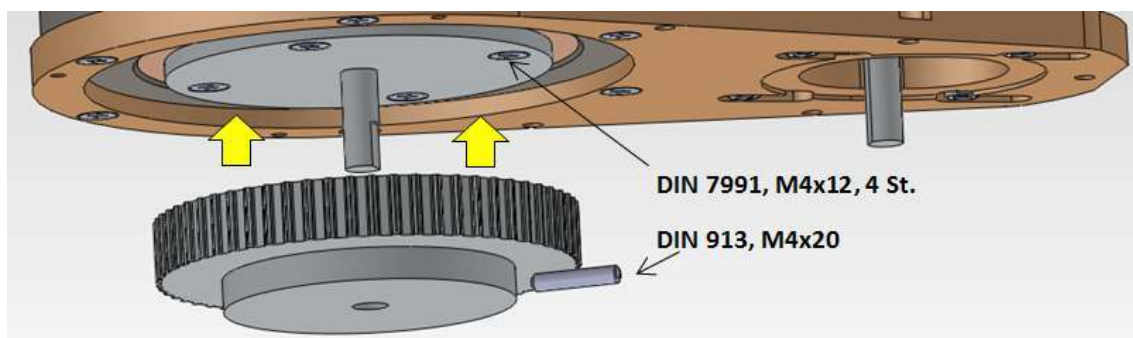


Abbildung 74, Zusammenbau des Wellenflansches

5.12 Riemendeckel

Dieses Teil (Abbildung 75) dient nicht nur der Riemenabdeckung sondern auch einer festen Verbindung zwischen der Linearführung und der Basis (5.10). Vier Zylinderschrauben mit Innensechskant machen den Riemendeckel an dem Lineartisch fest (Abbildung 76), während weitere acht Zylinderschrauben für die Befestigung mit der Basis verwendet sind.



Abbildung 75, hergestellter Riemendeckel

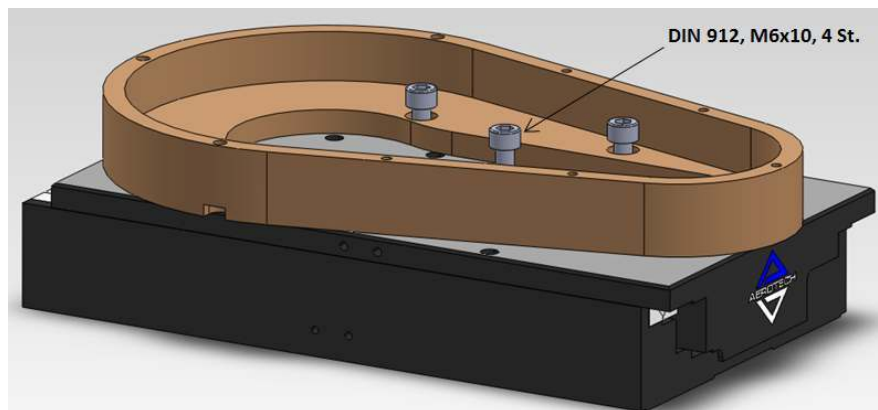


Abbildung 76, Zusammenbau des Riemendeckels

5.13 Montageplatte

Am oberen Teil der Baugruppe liegt die Montageplatte, die das Stück zwischen dem Rundtisch und den bürstenlosen Motoren ist. Die Platte besteht aus verschiedenen Bohrungen (Abbildung 77) an bestimmten Stellen, sodass die Positionierung der Motoren durch den Motorhalter auf der Platte möglich zu sein.

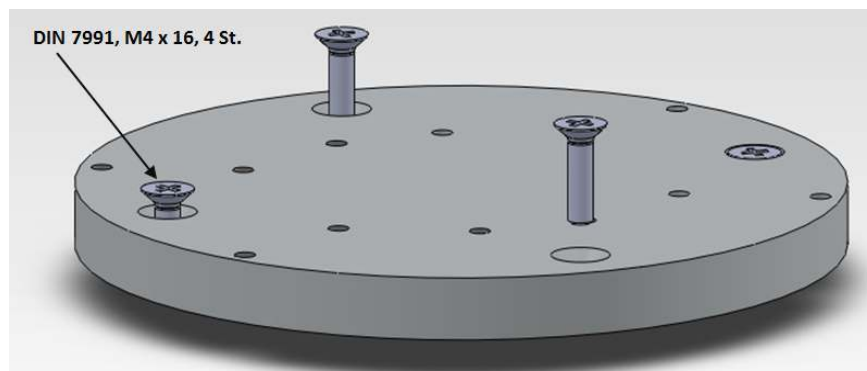


Abbildung 77, Montageplatte

5.14 Zusammenbauzeichnungen

Auf den folgenden Bildern werden die Explosionsdarstellung, der seitliche Querschnitt und die Zusammenbauzeichnung dargestellt.

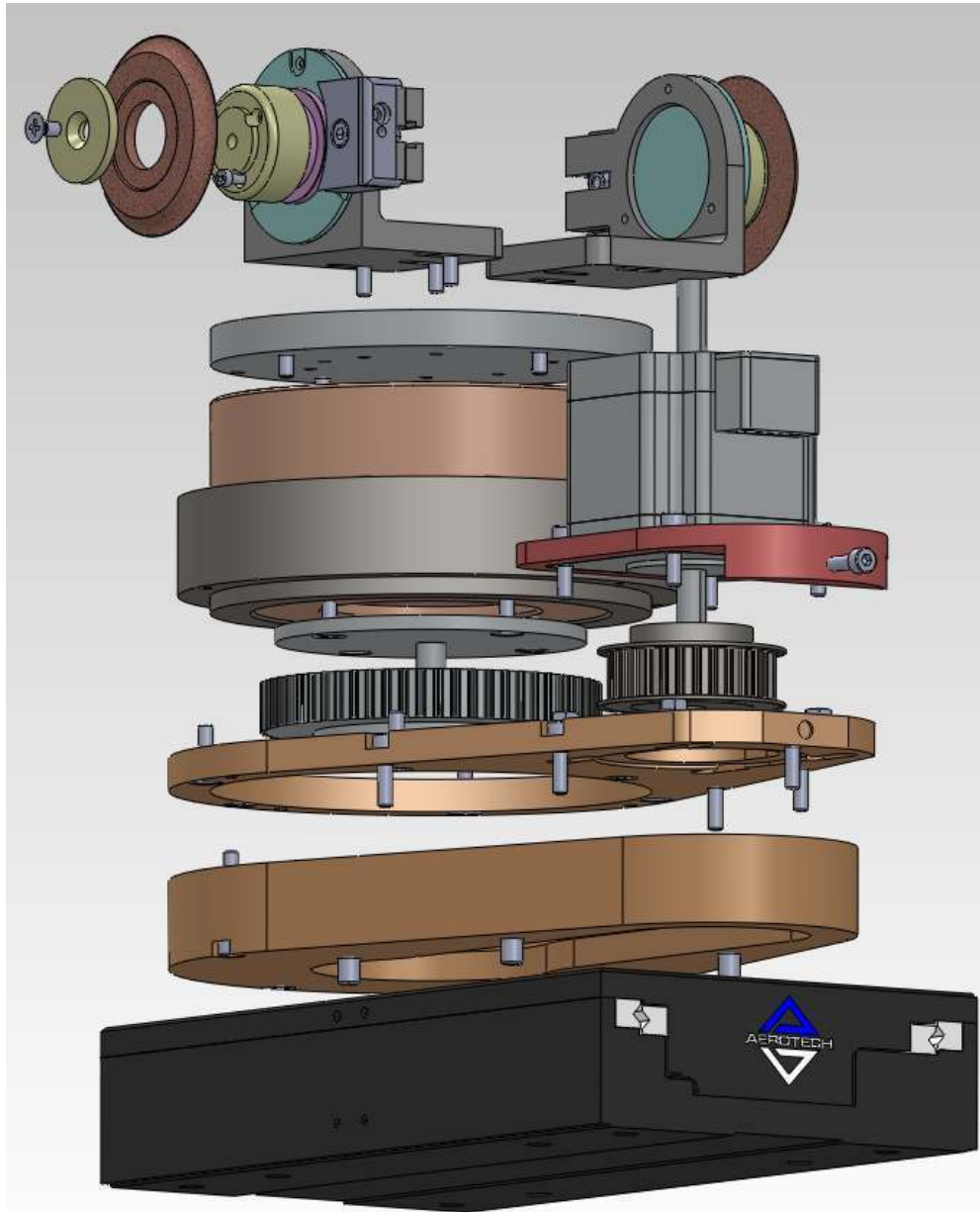


Abbildung 78, Explosionsdarstellung

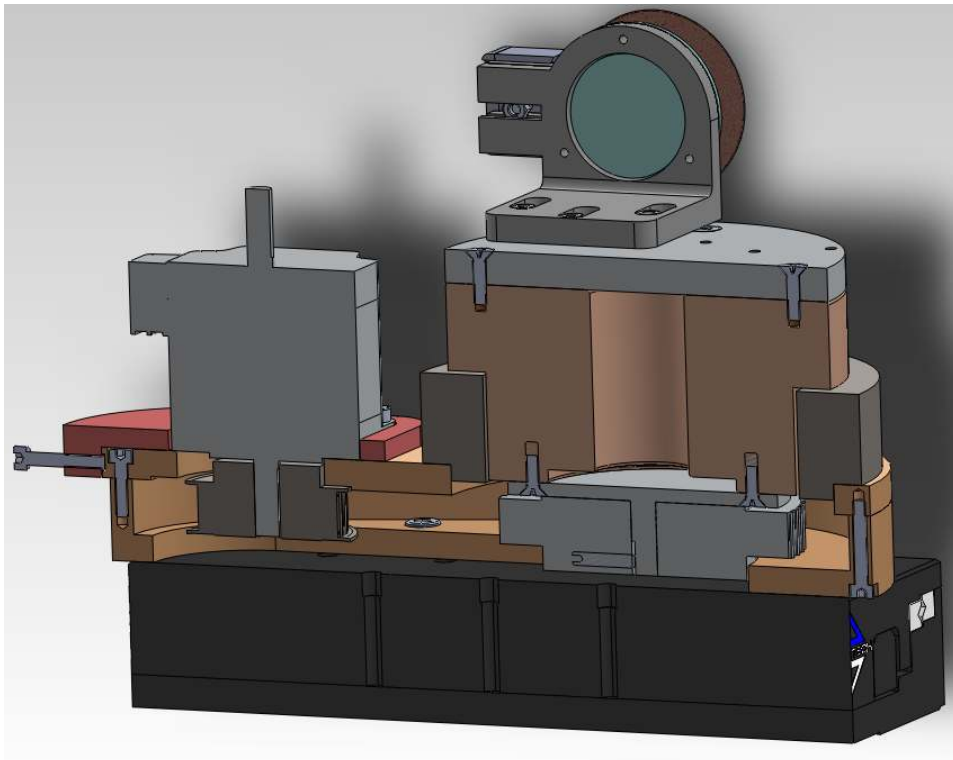


Abbildung 79, seitlicher Querschnitt

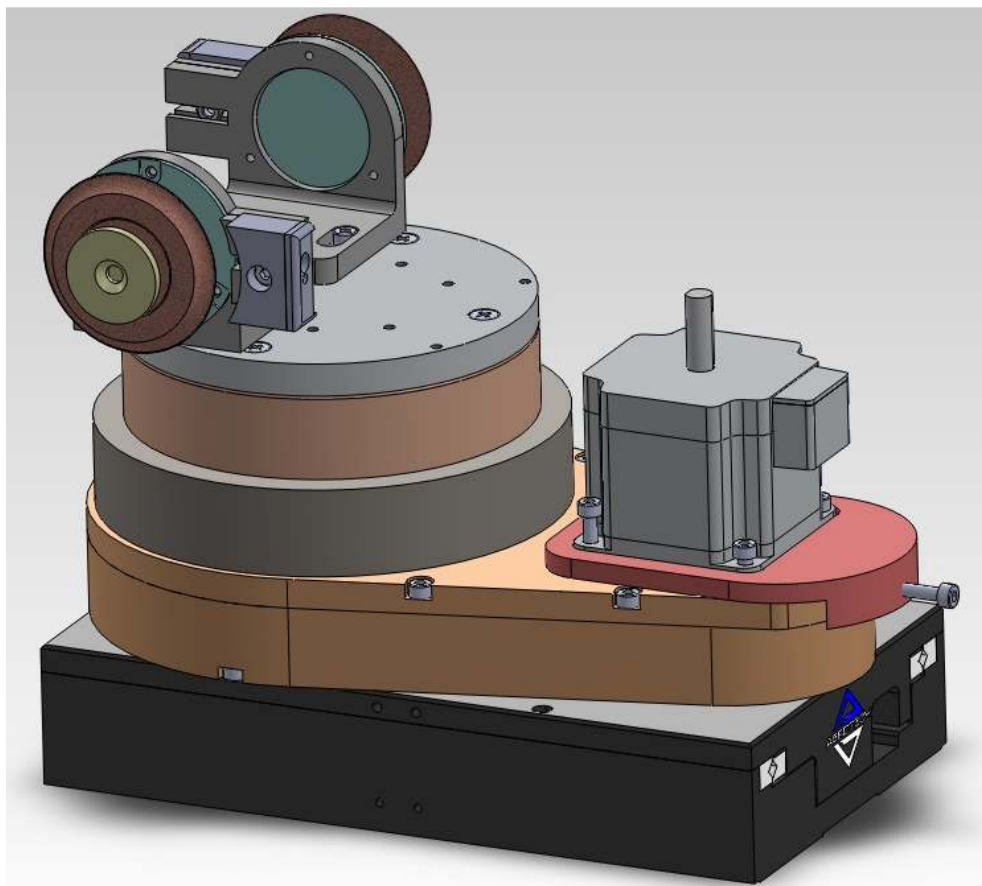


Abbildung 80, Zusammenbauzeichnung

5.15 Zusammenbau der Bauteile

Die folgenden Bilder zeigen die Montagereihenfolge der verschiedenen hergestellten Bauteile.

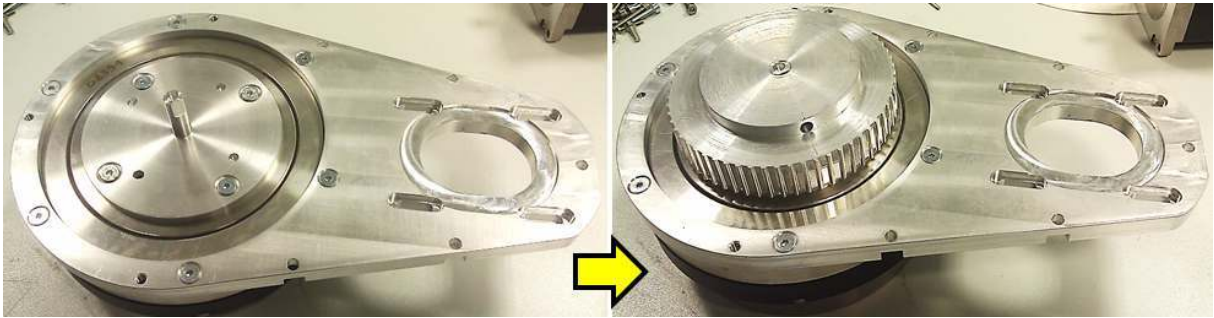


Abbildung 81, Montagereihenfolge der Bauteile

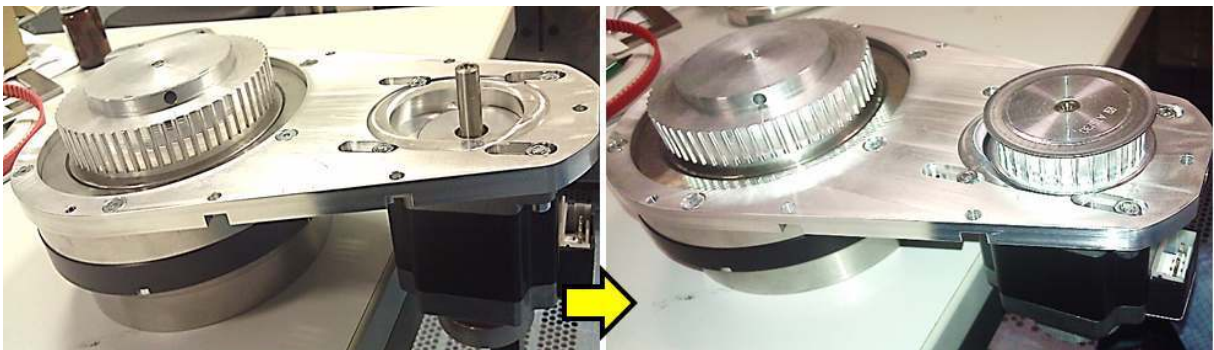


Abbildung 82, Montagereihenfolge der Bauteile

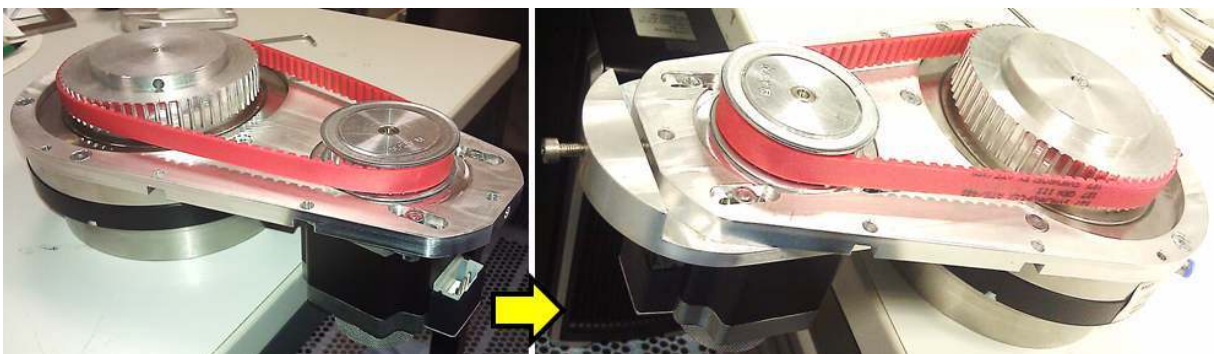


Abbildung 83, Montagereihenfolge der Bauteile



Abbildung 84, Montagereihenfolge der Bauteile

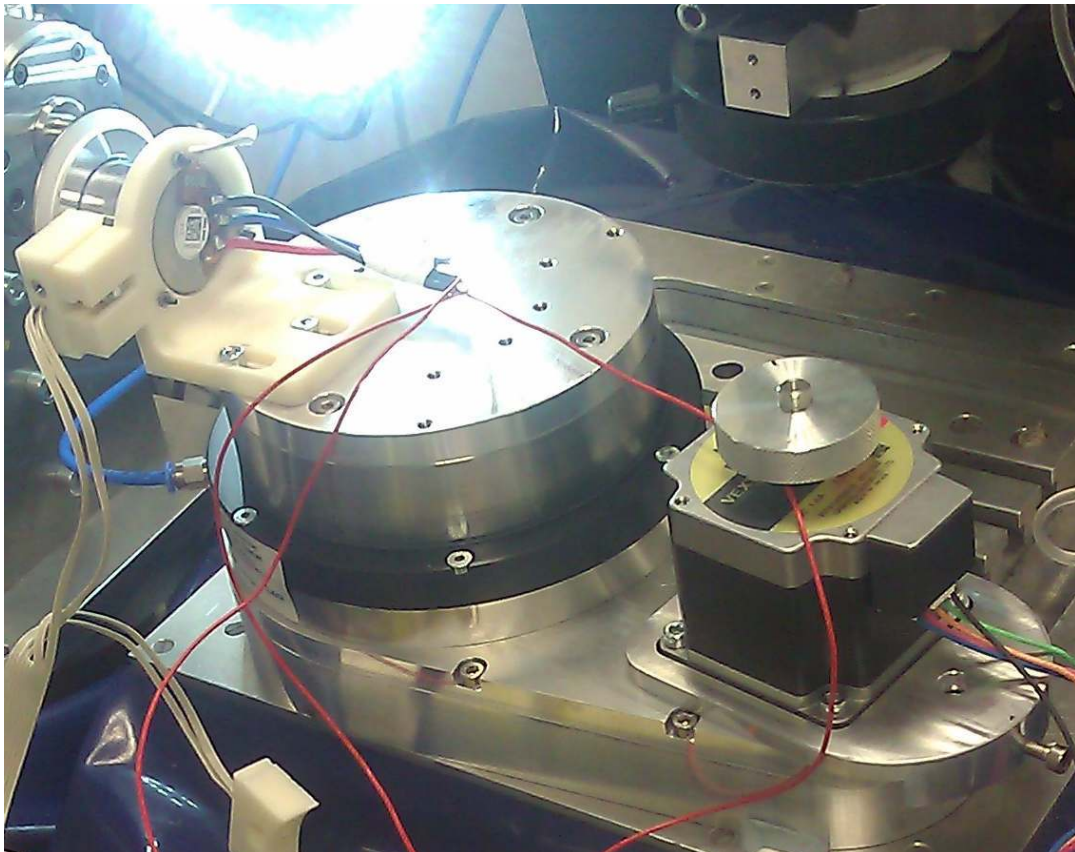
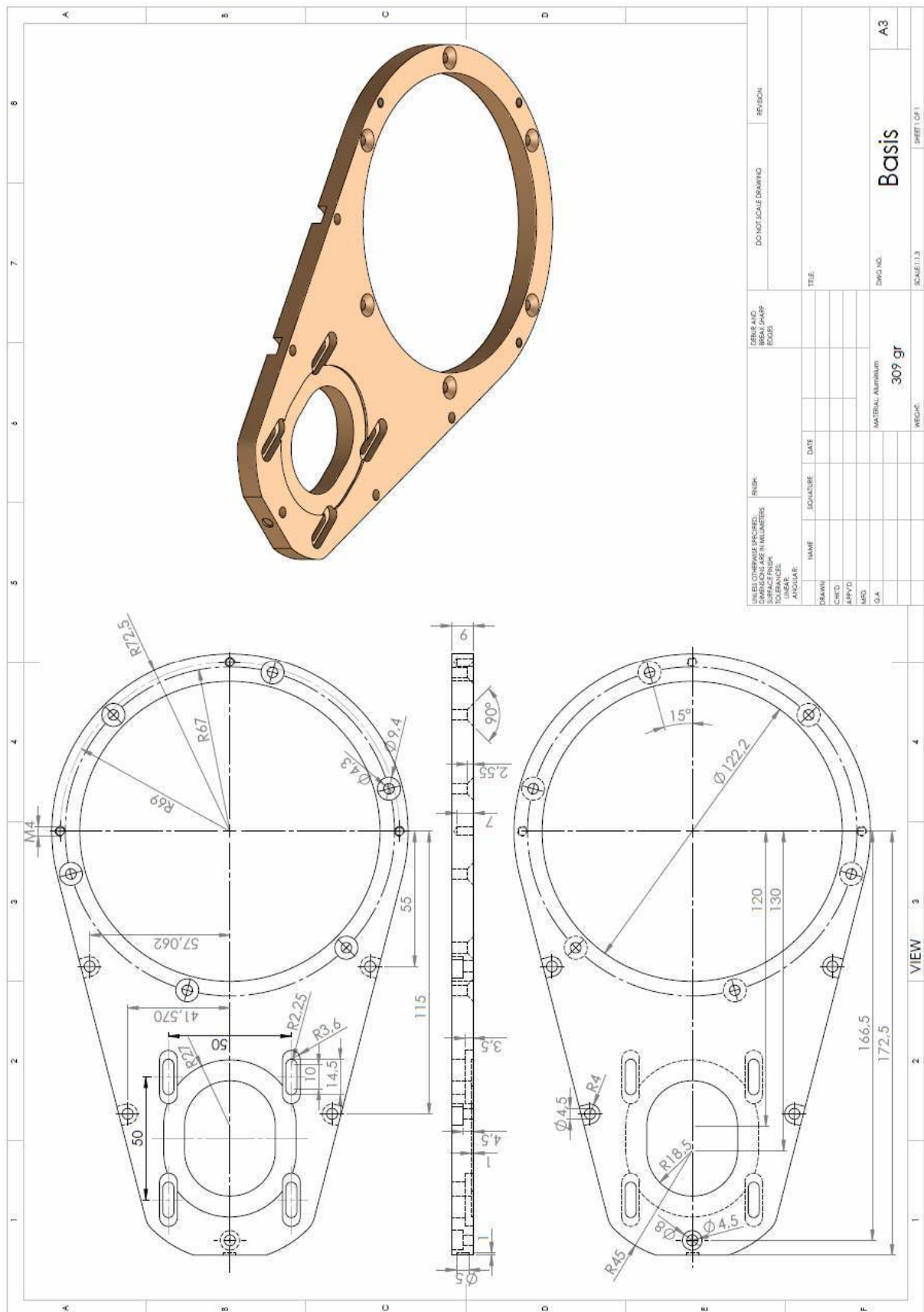
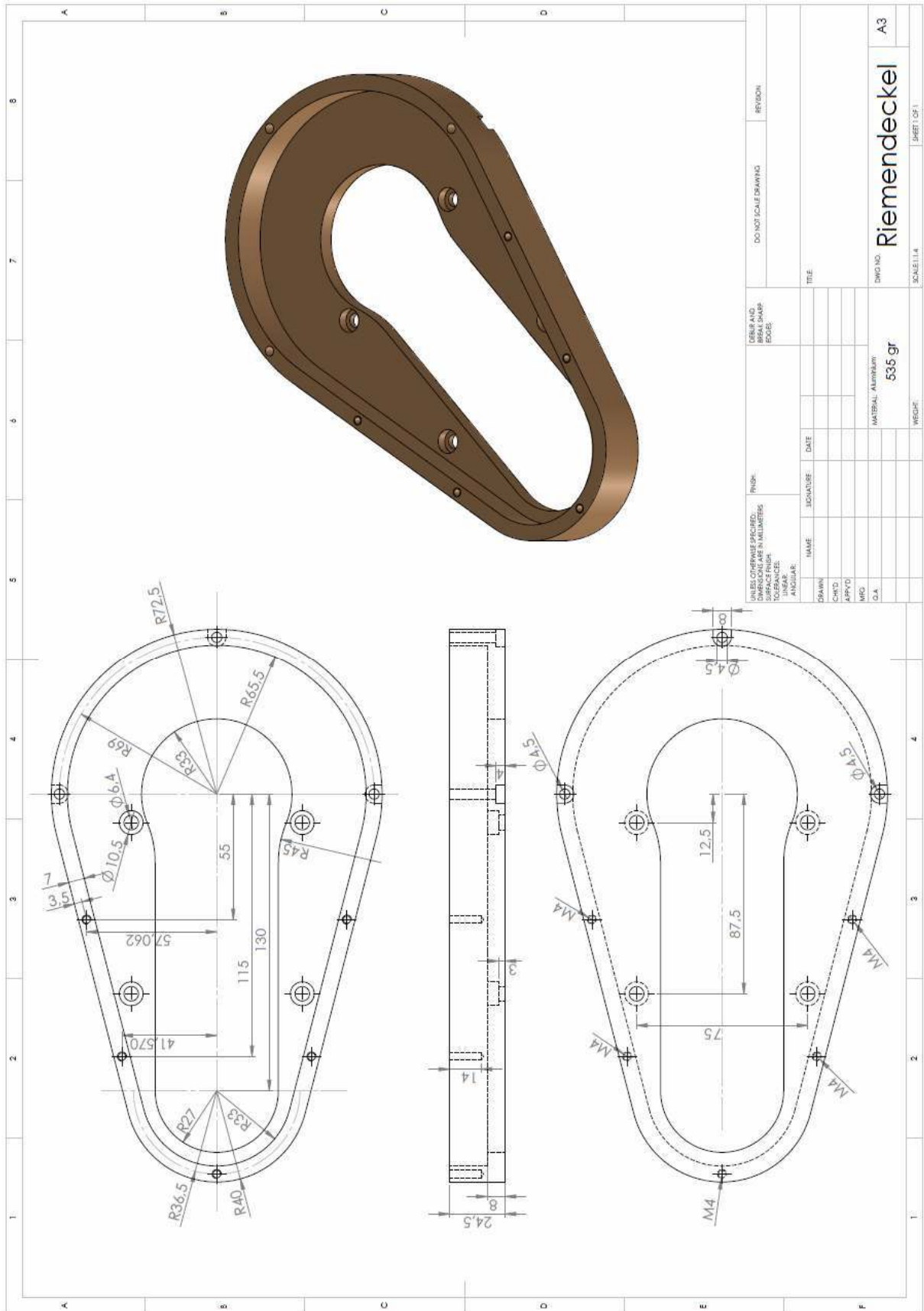
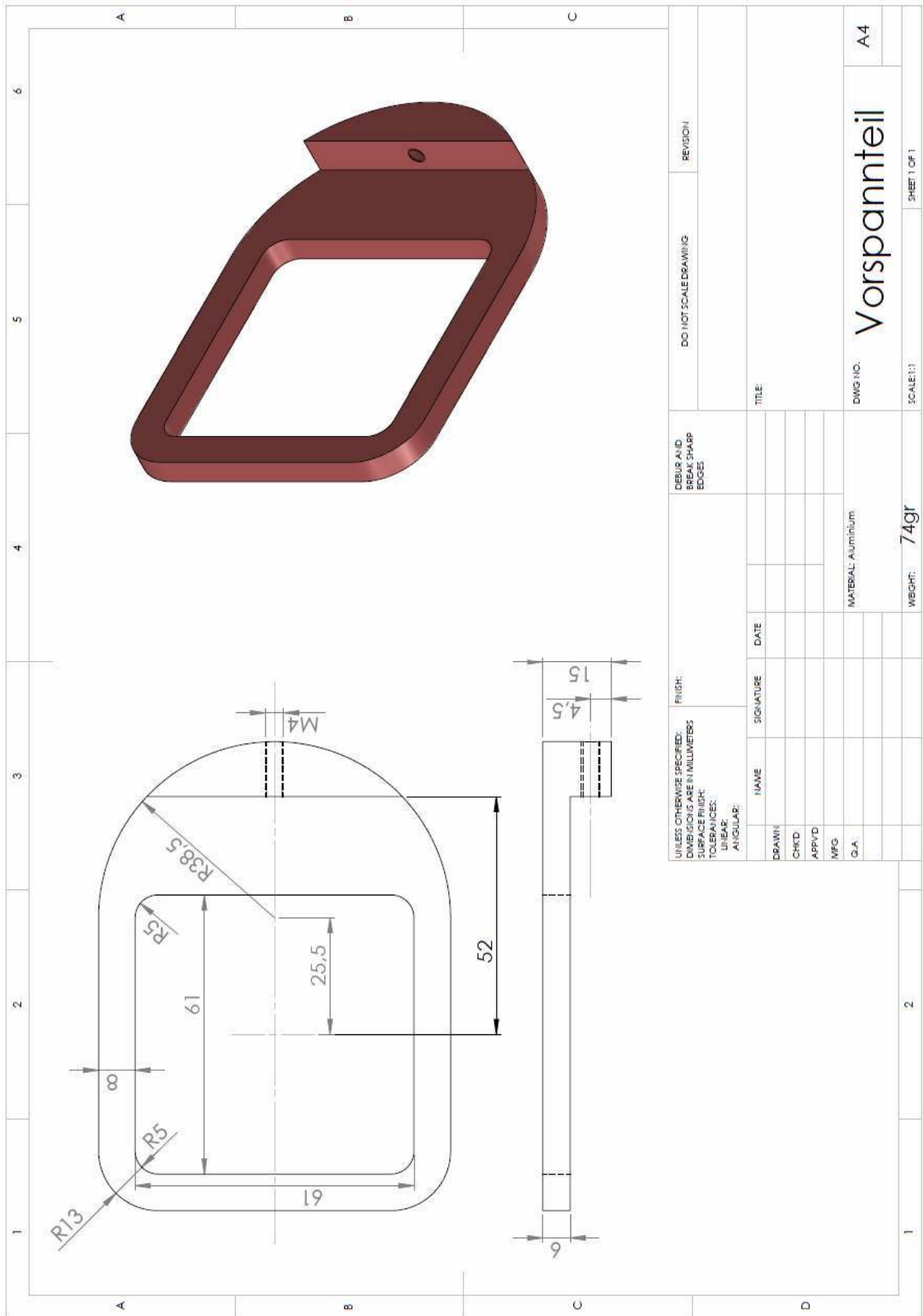


Abbildung 85, Montager Reihenfolge der Bauteile

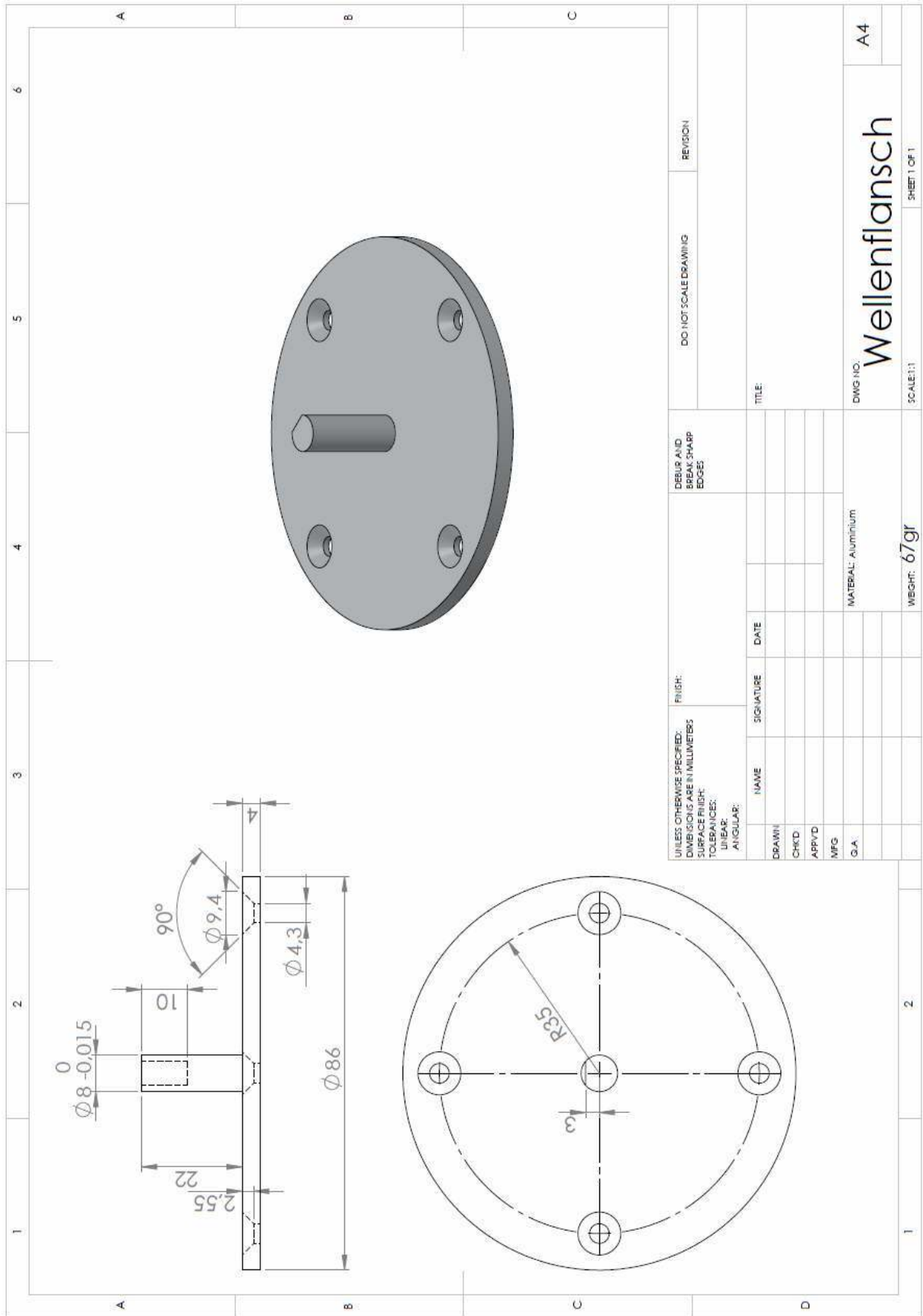
6 Konstruktionszeichnungen

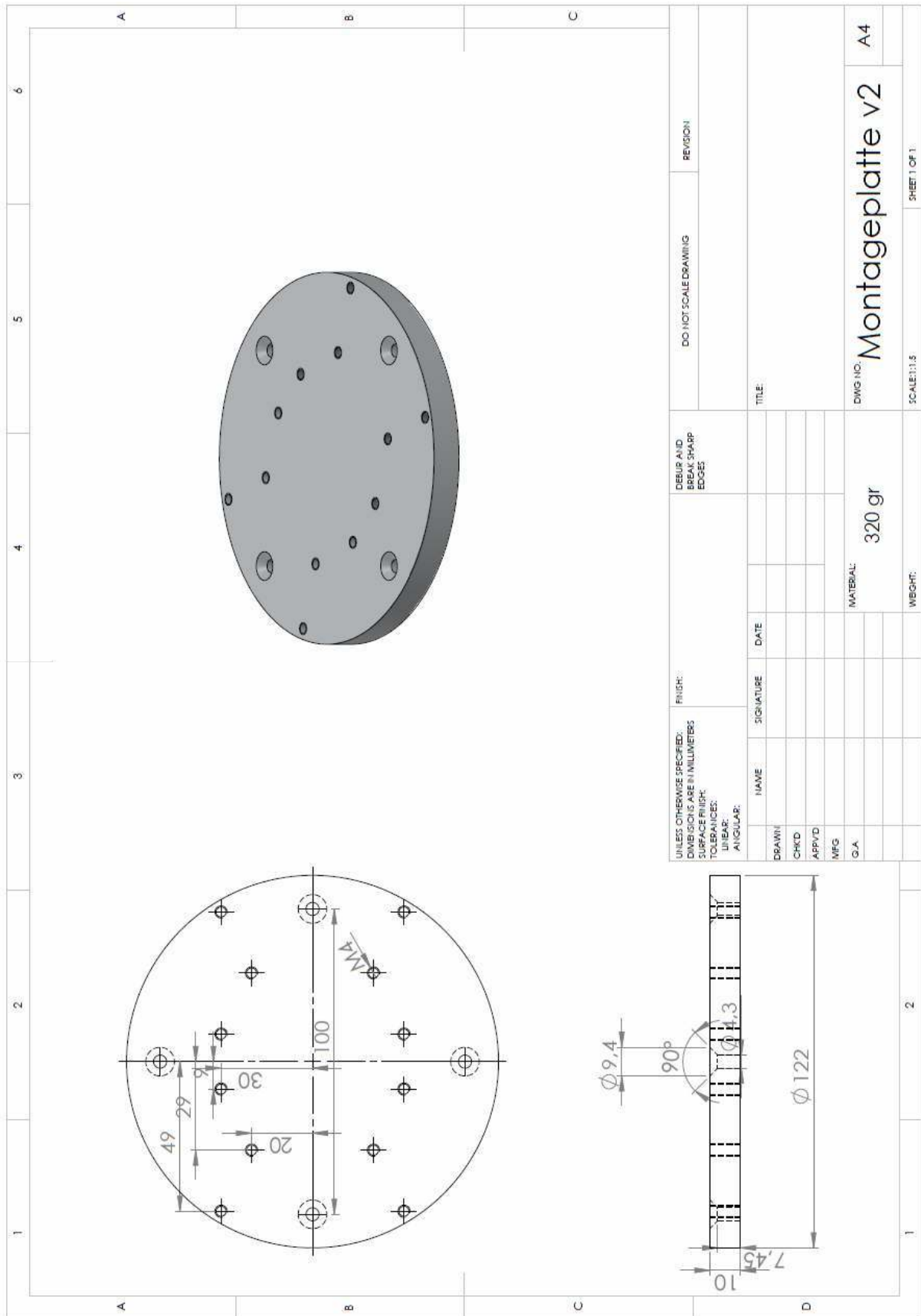


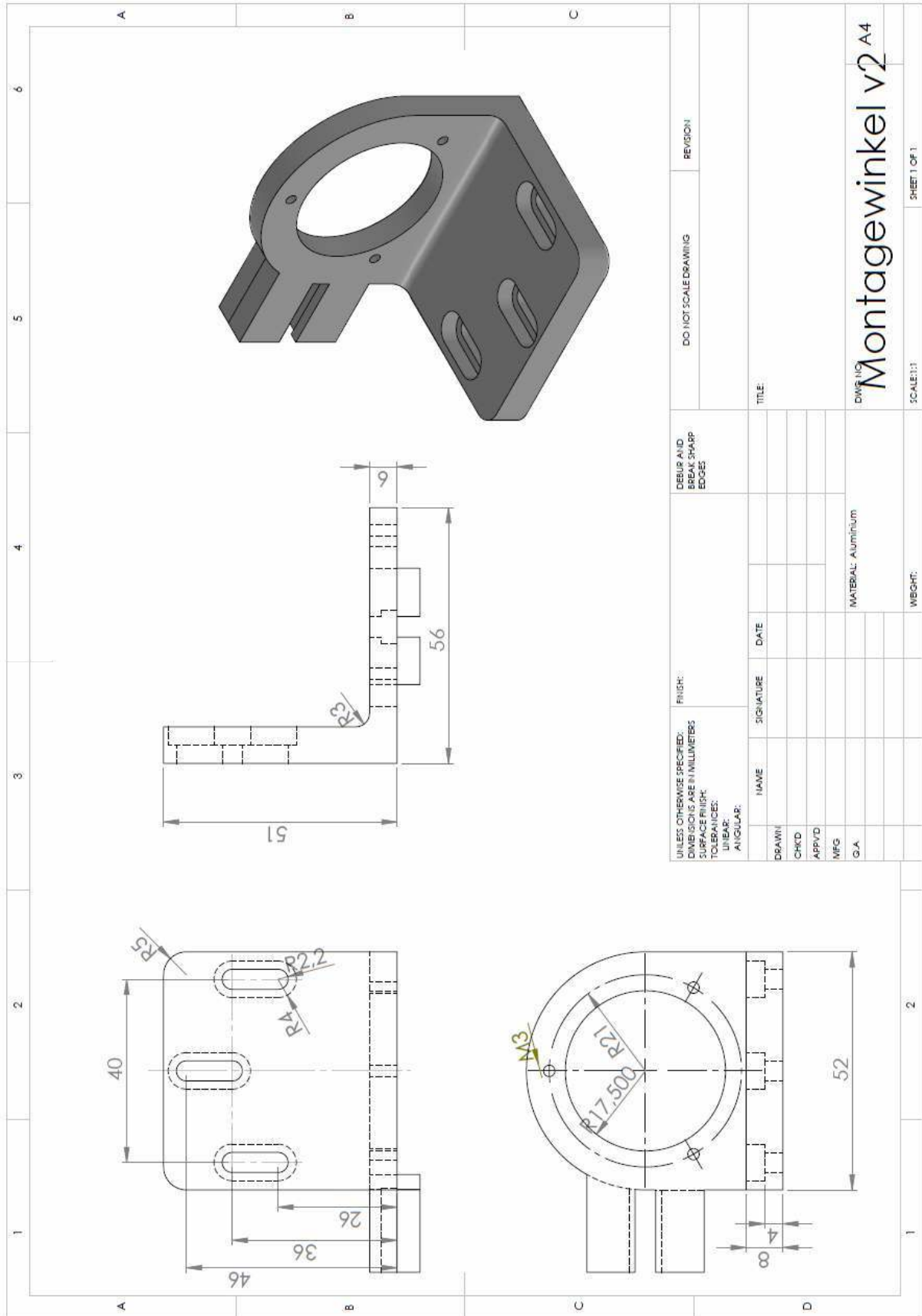


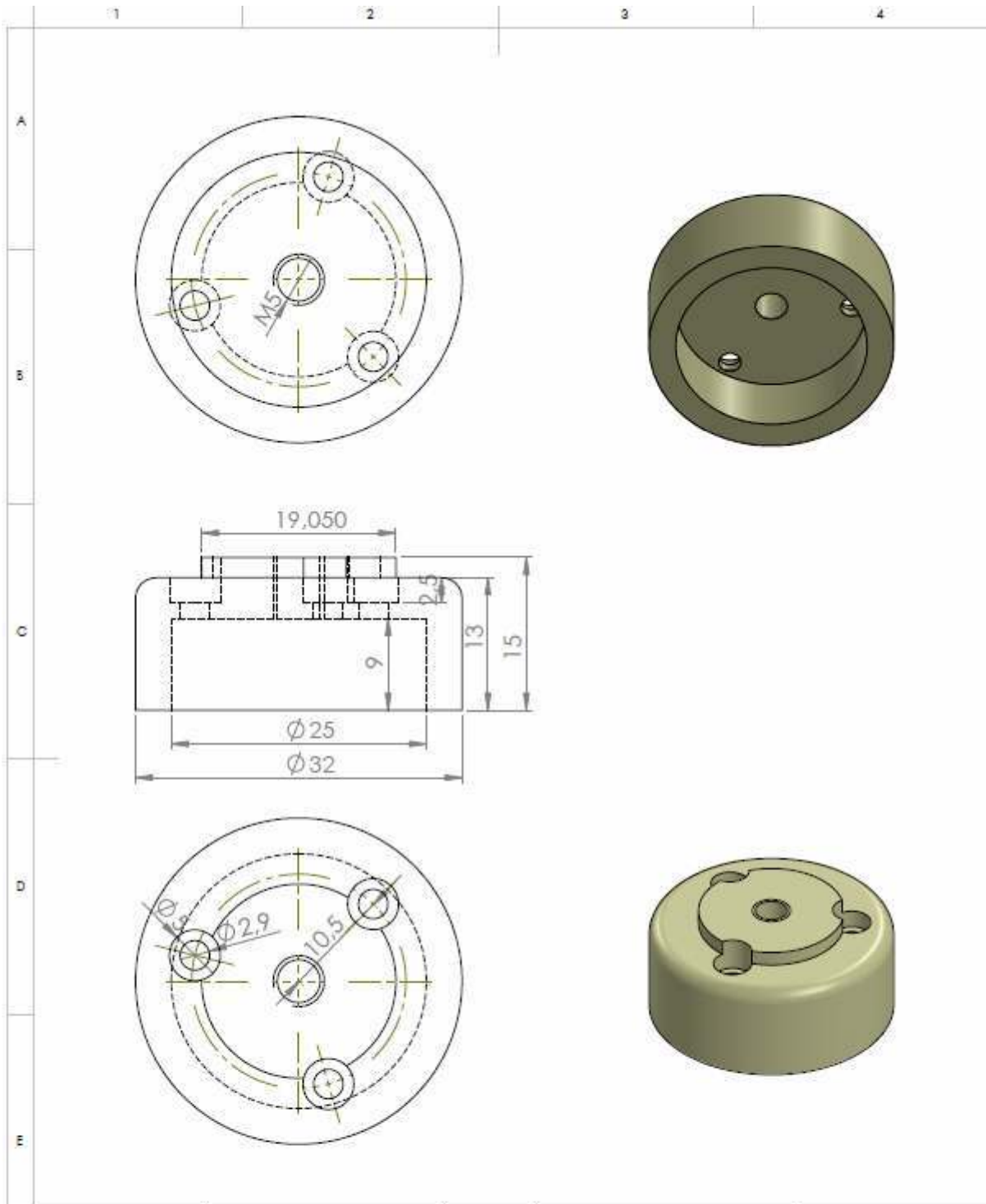


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS DIMENSIONS TO SURFACES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND REMOVE SHARP EDGES:		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE					
CHKD									
APPVD									
MFG									
G.A.									
				MATERIAL: Aluminium		DWS NO:		A4	
				WEIGHT: 74gr		SCALE: 1:1		SHEET 1 OF 1	









UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D									
APP'VD									
MFG.									
D.A.				MATERIAL:		DWG NO.		A4	
						Schleifscheibenhalter_1			
				WEIGHT: 19gr		SCALE: 2:1		SHEET 1 OF 1	

7 Inbetriebnahme

Da die entwickelte Maschine noch nicht fertig war, sollte die fertig montierte Baugruppe (es fehlt nur der Lineartisch) getestet werden. Nach diesem Schritt folgt der Herstellungsprozess eines Mikrowerkzeuges. Folgende Aufgaben müssen erst erledigt werden, damit das Ziel der Arbeit erreicht wird:

- Aufstellung der Baugruppe auf einem X-Y-Tisch
- Aufstellung der Spindel mit der Werkzeugaufnahme neben dem X-Y-Tisch
- Steuerung des 2-Achsentisches und des für die rotierende Bewegung verantwortlichen Schrittmotors
- Herstellungsprozess

7.1 Aufstellung der Baugruppe auf einem X-Y-Tisch

Am Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation Kaiserslautern (FBK) gibt es eine Hochpräzisions-Desktop-Bearbeitungsmaschine, deren X-Y-Tisch für die benötigte Prüfung der Konstruktion geeignet war und deshalb eingesetzt wurde. Die Benennungen der Achsen sowie die Position der Baugruppe auf dem Tisch sind auf dem nächsten Bild zu sehen.

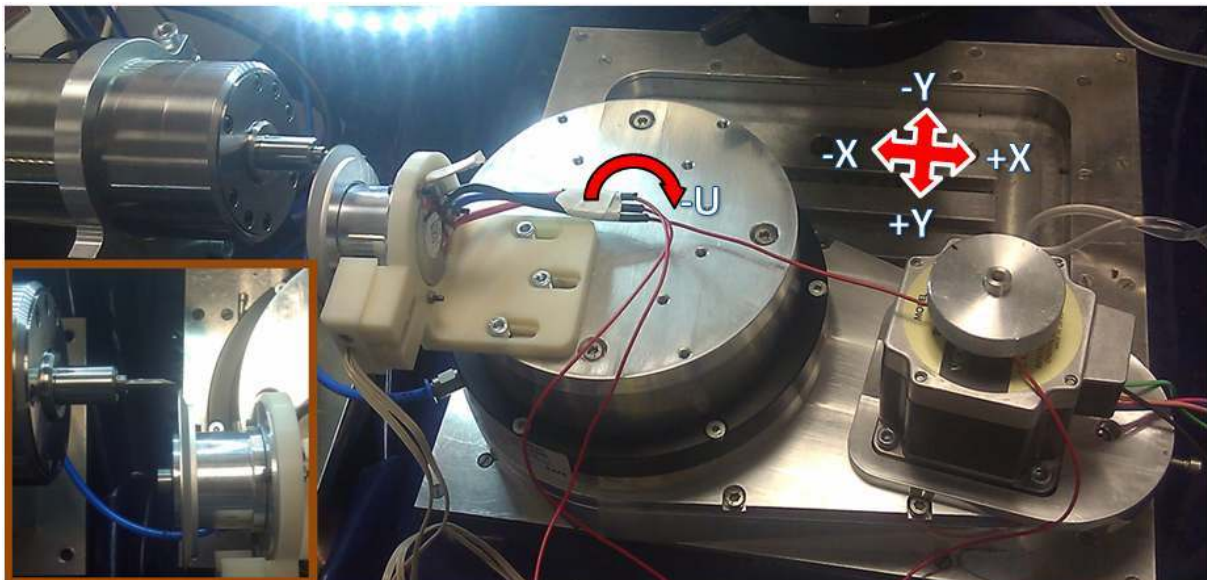


Abbildung 86, Versuchsaufbau und Benennungen der Achsen

7.2 Montage der Spindel

Der nächste Schritt war die Aufstellung der Spindel mit der Werkzeugaufnahme neben dem X-Y-Tisch. Da diese Position vorläufig war, wurde sie dort mithilfe zweier C-Klemmen befestigt. Die Parallelität zwischen der Spindel und dem Tisch wurde mit dem Einsatz eines Messgerätes und eines taktilen Sensors gewährleistet (siehe Abbildung 87).



Abbildung 87, Messung der Parallelität

7.3 Steuerung der Achsen

Für die Steuerung der Schrittmotoren der Achsen braucht man erstens ein Controller und zweitens eine PC-Anwendung. Der bei der FBK vorliegende Nstep Controller und das Programm A3200 der Firma Aerotech (Abbildung 88) genügten den Anforderungen des Systems und deswegen wurden sie für die Prüfung bevorzugt.

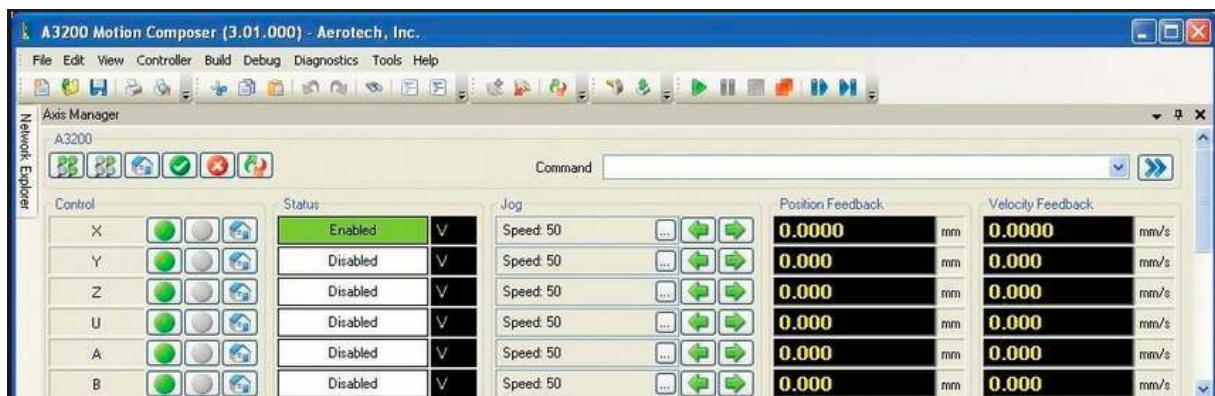


Abbildung 88, Software Aerotech A3200

7.4 Herstellungsprozess und Ergebnisse

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme der Schrittmotoren waren wir in der Lage, das Herstellungsverfahren eines neuen Mikrowerkzeuges zu vervollständigen. Das zylindrische Rohwerkstück verfügte über einen Durchmesser von 3,175 mm und auf der einen Seite hatte es eine Spitze. Die Spindel nahm das Werkstück auf und konnte es bis zu 120K RPM drehen.

Zuerst mussten die Null-Positionen der X- und Y-Achsen bestimmt werden. Aus diesem Grund wurde nur eine kleine Spitze am Ende des Werkstückes geschliffen (Abbildung 89). Bei diesem Schritt war zu beachten, dass die sehr langsame Bewegung der Y-Achse in Richtung Minus beim Bruch der Spitze sofort gestoppt werden musste. In diesem Punkt liegt nicht nur die Null-Position der Y-Achse, sondern auch der X-Achse.

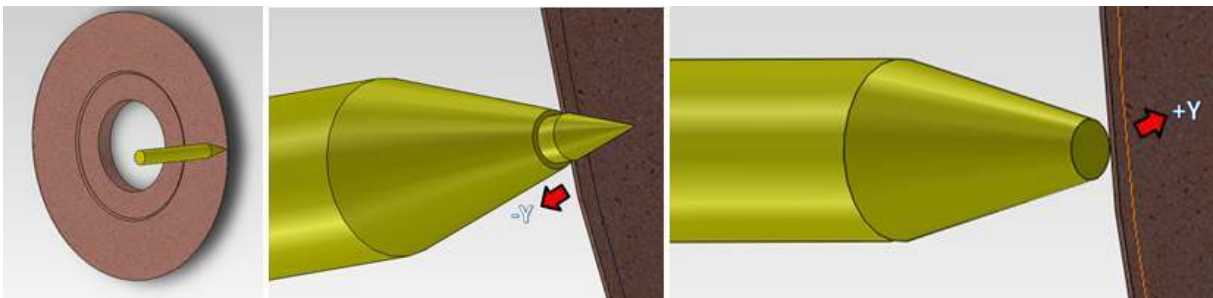


Abbildung 89, Herstellungsschritt eines Mikrowerkzeuges

Anschließend wird die Schleifscheibe um einige μm (z.B. 150 μm) in Richtung +Y entfernt und gleich danach mit sehr langsamem Vorschub 0.1 mm / Minute in Richtung -X verschoben (Abbildung 90). So entsteht ein kleinerer Zylinder mit Durchmesser 300 μm und Länge 300 μm . Der letzte Schritt wird noch ein paar Mal wiederholt, bis der erwünschte Durchmesser erreicht ist.

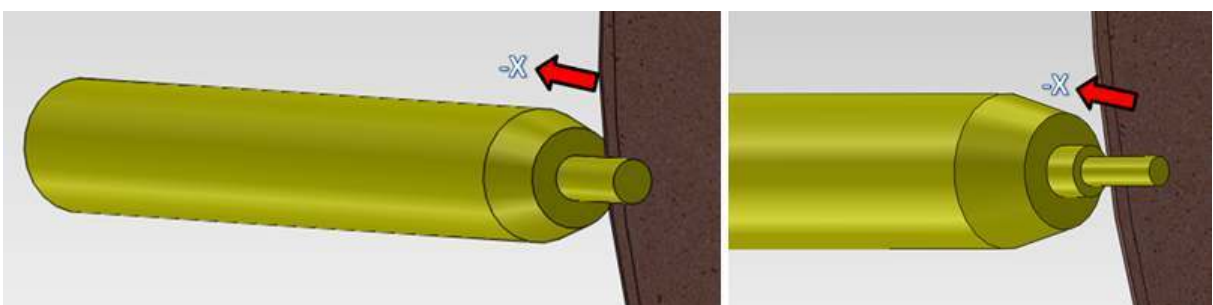


Abbildung 90, Herstellungsschritt eines Mikrowerkzeuges

Bei diesem Verfahren wurde ein Durchmesser des Werkzeuges von $4\ \mu\text{m}$ und einer Länge von $12\ \mu\text{m}$ erreicht (Abbildung 91, Abbildung 92). Das Verhältnis Länge zu Durchmesser 3:1 gilt als ideal, aber die Qualität der Oberfläche könnte besser sein. Da eine mittelkörnige (#3000) Schleifscheibe eingesetzt wurde, kann man davon ausgehen, dass das Verfahren durch Verwendung einer feinkörnigen Schleifscheibe optimiert werden kann. Zudem könnte ein langsamerer Vorschub bessere Ergebnisse erzielen.

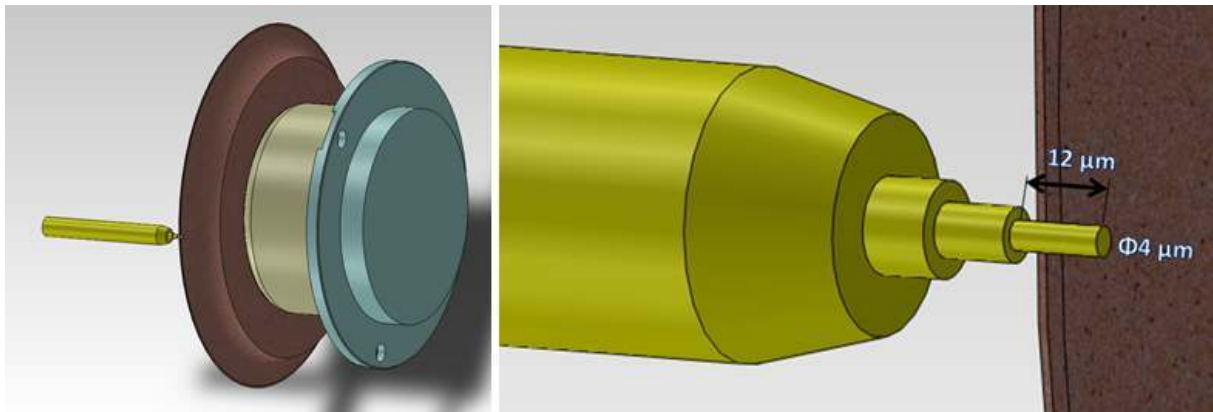


Abbildung 91, Herstellungsschritt eines Mikrowerkzeuges

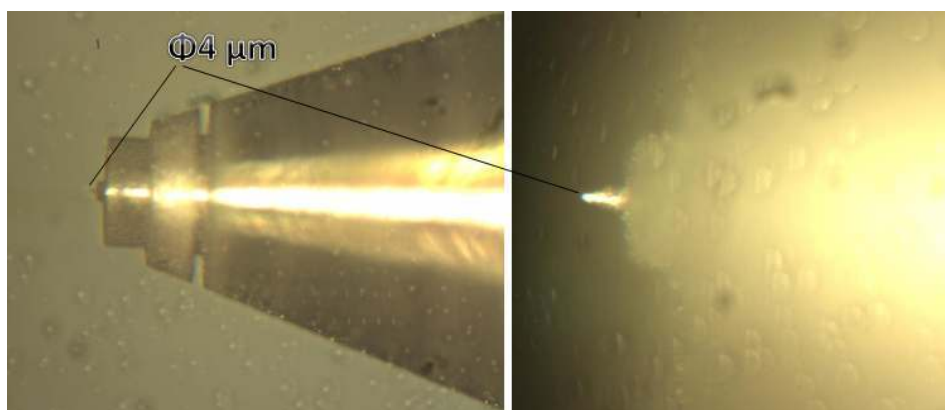


Abbildung 92, Erzeugtes Mikrowerkzeug mit Durchmesser $4\ \mu\text{m}$

Eine andere Variante des Mikrowerkzeuges ist auf den folgenden Bildern zu sehen. Der Durchmesser beträgt in dieser Variante $50\ \mu\text{m}$ und das Werkzeug sieht wie ein Mikrofräser aus.

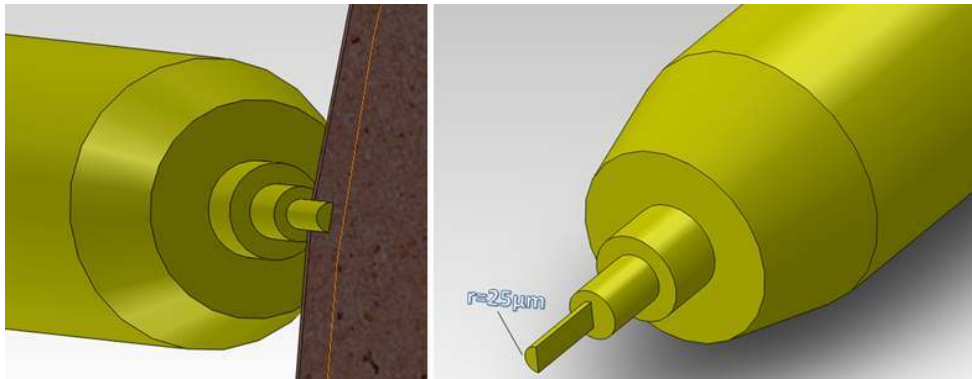


Abbildung 93, Herstellungsschritt eines Mikrowerkzeuges



Abbildung 94, Erzeugtes Mikrowerkzeug mit Durchmesser $50\mu\text{m}$

8 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein ultrapräziser Tisch aufgebaut, der über eine Linearachse und eine Drehachse verfügt. Zwei Schleifscheiben wurden auf den Tisch gelegt, deren Ziel es ist, einen neuen Mikrofräser durch einen Schleifprozess herzustellen. Das Rohstück befindet sich auf einer anderen Baugruppe der Maschine, deren Entwicklung und Aufbau hingegen nicht in dieser Arbeit enthalten ist.

Am Anfang der Arbeit wurden die verschiedenen Herstellungsprozesse der Mikrofräser vorgestellt und die besonderen Vorteile des Schleifens erläutert. Gleich danach wurden in der Literatur und im Internet untersucht, welche Bauelemente in Werkzeugmaschinen und besonders in modernen Maschinen verwendet werden. Es wurde festgestellt, dass ein Lineartisch mit Kreuzrollenführung und Linearantrieb die Ansprüche des Projekts erfüllt. Bezüglich der Drehachse ist ein vorhandener am FBK luftgelagerter Tisch genutzt, während ein Schrittmotor für die Umdrehung des Drehtisches über ein Zahnriemengetriebe bevorzugt wurde. Zwei bürstenlose Motoren des Festplattenherstellers Hitachi wurden für die rotatorische Bewegung der Schleifscheiben aufgestellt, deren Steuerung durch einen selbstgebauten Controller durchgeführt wird. Damit die vorgenannten Elemente zusammengebaut werden können, wurden verschiedene Bauteile in CAD entworfen und in der Werkstatt der TU Kaiserslautern auf CNC-gesteuerten Fräsmaschinen hergestellt.

Die Teile der Konstruktion wurden am Ende miteinander montiert und getestet. Obwohl die andere Baugruppe der neu entwickelten Maschine noch nicht fertig war, wurde die Konstruktion einzeln getestet. Ein neuer Mikrofräser mit Durchmesser $4\ \mu\text{m}$ ist entstanden. Das Projekt wurde erfolgreich beendet und das Ziel der Arbeit ist erreicht.

9 Literaturverzeichnis

- [Mahe10] Mahendran; Devarajan; Nagarajan; Majdi; : A Review of Micro-EDM, Hong Kong, 2010.
- [Dawe97] Dawes, R.C., Aspinwall: A review of ultra high speed milling of hardened steels, Elsevier Science S.A., 1997.
- [Kuni05] Kunieda, M. ; Lauwers B.; Rajurkarc, K.P.; Schumacherd, B.M.: Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process, CIRP Annals, 2005.
- [Sloc92] Slocum, A.: Precision Machine Design, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1992.
- [Brec03] Brecher,C; Utsch, P.; Klar, R.; Wenzel, C.: Compact design for high precision machine tools, Elsevier Ltd., Aachen Germany, 2003.
- [Auri11] Aurich, J. ; Reichenbach, I. ; Walk, M. ; Carrella, M. : Detektion von Oberflächen in der spanenden Mikrobearbeitung, Werkstattstechnik online, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2011.
- [Take00] Takeuchia, Y.; Sakaidab, Y.; Sawadab, K.; Satac, T.: Development of a 5-Axis Control Ultraprecision Milling Machine for Micromachining Based on Non-Friction Servomechanisms, CIRP Annals, 2000.
- [Pica02] Picard, Y.N.; Adams, D.P.; Vasile, M.J.; Ritchey, M.B.: Focused ion beam-shaped microtools for ultra-precision machining of cylindrical components, Elsevier Ltd., USA, 2002.
- [Auri13] Aurich, Jan C.; Christopher, M.; Walk, M: High-frequency tool-spindle for multi-functional, replaceable, rotor-modules, Springer, Kaiserslautern, 2013.
- [Dong08] Dong-Yea Sheu : High-speed micro electrode tool fabrication by a twin-wire EDM system, National Taipei University of Technology, Taiwan, 2008.
- [Chae04] Chae, J.; Park, S.S.; Freiheit, T.: Investigation of micro-cutting operations, Elsevier Ltd, University of Calgary, Canada , 2005.
- [Alle09] Allen, D.M.; Shore, P.; Evans, R.W.; Fanara, C.; O'Brien, W. ; Marson, S.; O'Neill, W. : Ion beam, focused ion beam, and plasma discharge machining, CIRP Annals, 2009.
- [Ruß00] Ruß, August G.: Linearlager und Linearführungssysteme, Expert Verlag, 2000.
- [Alti11] Altintas Y.; Verl, A.; Brecher, C.; Uriarte, L.; Pritschow, G. : Machine tool feed drives, CIRP Annals, 2011.
- [Uria09] Uriarte, L.; Eguia, J.; Egaña, F. : Machine Tools for High Performance Machining, Springer Verlag, London, 2009.

- [Auri12]** Aurich, Jan C.; Reichenbach, Ingo G.; Schüler, Guido M.: Manufacture and application of ultra-small micro end mills, CIRP Annals, University of Kaiserslautern, 2012.
- [Bohl10]** Bohley, M.: Konzepterstellung und Konstruktion einer Desktop-Werkzeugschleifmaschine zur Herstellung und Anwendung von Mikroschleifstiften, Diplomarbeit, TU Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2010.
- [Alti03]** Alting, L.; Kimura, F.; Hansen, H.N.; Bissacco, G. : Micro Engineering, CIRP Annals, 2003.
- [Walk11]** Walk, M.; Carrella, M.; Schueler, G.M.; Engmann, J.; Aurich, J.C. : Micro Pencil Grinding Tools: Manufacturing, Application, and Results, University of Kaiserslautern, 2011.
- [Schu09]** Schueler, G. M. ; Engmann, J. ; Marx, T. ; Haberland, R.; Aurich, J. C. : Micro Structuring of Biocompatible Titanium-Alloys with Ultra-small Micro-End Mills, University of Kaiserslautern, 2009.
- [Zhan12]** Zhang, Zhiyu ; Peng, Huanming ; Yan, Jiwang : Micro-cutting characteristics of EDM fabricated high-precision polycrystalline diamond tools, ElsevierLtd., 2012.
- [Vasi96]** Vasile, Michael J.; Friedrich, Craig R.; Kikkeri, Bharath; McElhannon, Rob : Micrometer-scale machining: tool fabrication and initial results, Elsevier Science Inc., Louisiana Tech University, USA, 1996.
- [Adam00]** Adamsa, David P.; Vasileb, Michael J.; Benavidesa, Gilbert; Campbella, Ann N.: Micromilling of metal alloys with focused ion beam–fabricated tools, Elsevier Science Inc, 2000.
- [Scha99]** Schaller, Th.; Bohn, L.; Mayer, J.; Schubert, K. : Microstructure grooves with a width of less than 50 mm cut with ground hard metal micro end mills, Elsevier Science Inc., Karlsruhe Research Center (FZK), 1999.
- [Venk07]** Venkatesh, V.C.; Izman, Sudin : Precision Engineering, Tata McGraw-Hill Publishing Company, USA, 2007.
- [Morg03]** Morgan, Chris; Shreve, Shelby; Vallance, R. Ryan : Precision of micro shafts machined with Wire Electro-Discharge Grinding, Winter Topical Meeting, University of Kentucky, USA, 2003.
- [Masu00]** Masuzawa, T : State of the Art of Micromachining, Institute of Industrial Science, Annals of the CIRP, University of Tokyo, Japan, 2000.

- [Cama12]** Camara, M.A. ; Rubio, J.C. Campos; Abrao, A.M.; Davim, J.P. : State of the Art on Micromilling of Materials, a Review, Journal of Materials Science & Technology, 2012.
- [Auri10]** Aurich, Jan c. : Strukturgrößen unter 10 µm wirtschaftlich fertigen, MM Maschinenmarkt 26, Kaiserslautern, 2010.
- [Cher06]** Chern, Gwo-Lianq; Engin Wu, Ying-Jeng; Cheng Cheng, Jyun; Yao, Jian-Cheng : Study on burr formation in micro-machining using micro-tools fabricated by micro-EDM, Elsevier Inc., National Yunlin University of Science and Technology, Taiwan, 2006.
- [Egas02]** Egashira, K. ; Mizutani, K. : Ultrasonic Vibration Drilling of Microholes in Glass, CIRP Annals, 2002.
- [Klei99]** Klein Wernen, Utrapräzisionsbearbeitung mit Schrittmotor-Achsantrieben, Doktorarbe, TU Kaiserslautern, 1999.
- [Goto13]** Gotoha, H.; Tania, T. ; Okadaa, M. ; Gotob, A.; Masuzawac, T.; Mohri, N. : Wire electrical discharge milling using a wire guide with reciprocating rotation, 17th CIRP Conference, 2013.
- [Masu85]** Masuzawa, T. ; Fujino, M.; Kobayashi, K. : Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining, Annals of the CIRP Vol. 34, 1985.
- [Raim09]** Raimund, P.: Handbuch Zahnriementchnik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [Masu08]** Masuzawaa, T. ; Fujinoa, M.; Kobayashia, K.; Suzukib, T.; Kinoshita N. : Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining, CIRP Annals, 2008.
- [Cont05]** Continental : Zahnriemen, ContiTech AG, 2005.
- [Cont12]** Continental : Synchroflex Polyurethane Timing Belts- Overall catalog, 2012.
- [Opti13]** Optibelt: Technisches Handbuch Zahnriemenantriebe Polyurethan, 2013.
- [Gate11]** Gates Mectrol : Urethane Timing Belts and Pulleys, 2011.
- [Orie14]** Orientalmotor : Scrittmotor CRK566PMBP, <http://www.orientalmotor.de/Products/Stepper_motors/Dc_motor_driver_packages/Without_integrated_controller/5phase_microstep_crk/?&arid=2057&dwn=artnr>, 2014.
- [Aero14]** Aerotech Inc. ANT130-L Series Single-Axis Linear Direct-Drive, <http://www.aerotech.com/product-catalog/stages/linear_stages/ant130-l.aspx>, 2014.

Hiermit erkläre ich, Ioannis Makris, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

.....

Ioannis Makris